

ALESSANDRA DE BARROS E SILVA BONGIOLO

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA BACIA DO AMAZONAS E SEU
EMBASAMENTO ATRAVÉS DA MAGNETOMETRIA E GRAVIMETRIA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Geologia Exploratória.

Orientador:
Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira

CURITIBA
2011

Bongiolo, Alessandra de Barros e Silva

Contribuição ao estudo da Bacia do Amazonas e seu embasamento através da magnetometria e gravimetria / Alessandra de Barros e Silva Bongiolo. – Curitiba, 2011.

172 f. : il.; graf., tab.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geologia
Orientador: Francisco José Fonseca Ferreira

1. Bacias sedimentares. 2. Geofísica. 3. Bacias (Geologia) - Amazonas. I. Ferreira, Francisco José Fonseca. I. Título.

CDD 551.483

TERMO DE APROVAÇÃO

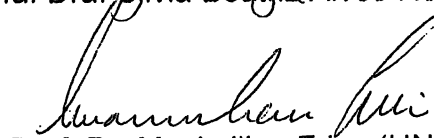
Alessandra de Barros e Silva Bongioio


*Contribuição ao estudo da Bacia do Amazonas e seu embasamento
através da magnetometria e gravimetria.*

Tese de doutorado aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia, Área de Concentração Geologia Exploratória, da Universidade Federal do Paraná, pela comissão constituída pelos membros que assinam abaixo.

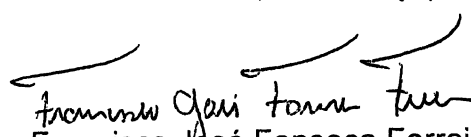
Curitiba, 26 de agosto de 2011.


Profa. Dra. Silvia Beatriz Alves Rolim (UFRGS)


Prof. Dr. Maximilian Fries (UNIPAMPA)


Prof. Dr. Carlos Eduardo de Mesquita Barros (UFPR)


Prof. Dr. Leonardo Fadel Cury (UFPR)


Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira (UFPR)
Presidente

*“para Gilson,
Haroldo, Deize e Claudia”*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	1
1.2 OBJETIVOS E METAS DO TRABALHO	2
1.3 LOCALIZAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO E DAS TRÊS SUBÁREAS	4
2 MATERIAL E MÉTODOS	6
2.1 MAPAS BASE	6
2.2 FONTES DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS	7
2.3 FONTES DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS	9
2.4 PRÉ-PROCESSAMENTO	10
2.4.1 Análise crítica e geração do mapa magnético residual	10
2.4.2 Análise crítica e geração do mapa gravimétrico Bouguer	11
2.5 PROCESSAMENTO QUALITATIVO - PRINCIPAIS MÉTODOS DE REALCE DE ANOMALIAS	13
2.5.1 Redução ao polo	13
2.5.2 Continuações ascendentes	15
2.5.3 Gradiente vertical (Gz)	16
2.5.4 Gradientes horizontais (Gx; Gy)	16
2.5.5 Gradiente horizontal total (GHT)	16
2.5.6 Amplitude do sinal analítico (ASA)	17
2.5.7 Inclinação do sinal analítico (ISA)	19
2.5.8 Gradiente horiz. total da inclin. do sinal analítico (GHT_ISA)	20
2.5.9 Theta map	21
2.5.10 Inclín. do sinal analítico do gradiente horiz. total (ISA_GHT)	21
2.5.11 Inclinação do gradiente horizontal total (IGHT)	22
2.6 PROCESSAMENTO SEMI-QUANTITATIVO	22
2.6.1 Espectro de potência radial	22
2.6.2 Deconvolução de Euler	23
3. MODELOS SINTÉTICOS – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
4 GEOLOGIA REGIONAL E LITOESTRATIGRAFIA DA BACIA E CRÁTON DO AMAZONAS	42
4.1 GEOLOGIA DO EMBASAMENTO	44

4.2	GEOLOGIA DA BACIA	48
4.3	ARCABOUÇO ESTRUTURAL REGIONAL	54
4.4	MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO	60
5	RESULTADOS OBTIDOS	63
5.1	SÍNTESE DA INTEGRAÇÃO GEOFÍSICO-GEOLÓGICA DA BACIA DO AMAZONAS	63
5.1.1	Integração estrutural-gravimétrica	63
5.1.2	Integração estrutural-magnética	69
5.1.3	Integração gravimétrica-magnética	77
5.1.4	Discussão	78
5.2	SUBÁREA TAPAJÓS	80
5.2.1	Localização	80
5.2.2	Material	81
5.2.3	Geologia da subárea Tapajós	84
5.2.4	Geologia estrutural da Bacia do Amazonas e do seu embasamento na subárea Tapajós	86
5.2.5	Análise de lineamentos	88
5.2.6	Arcabouço geofísico	90
5.2.7	Discussão	105
5.3	SUBÁREA XINGU	106
5.3.1	Localização	106
5.3.2	Material	107
5.3.3	Geologia da subárea Xingu	110
5.3.4	Geologia estrutural da Bacia do Amazonas e do seu embasamento na subárea Xingu	111
5.3.5	Análise de lineamentos	114
5.3.6	Arcabouço geofísico	115
5.3.7	Discussão	130
5.4	SUBÁREA MONTE ALEGRE	131
5.4.1	Localização	131
5.4.2	Material	132
5.4.3	Geologia da subárea Monte Alegre	135
5.4.4	Geologia estrutural da Bacia do Amazonas e do seu embasamento na subárea Monte Alegre	138
5.4.5	Análise de lineamentos	139
5.4.6	Arcabouço estrutural-magnético	140
5.4.7	Arcabouço estrutural-gravimétrico	153
5.4.8	Discussão	160
6	CONCLUSÕES	163
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165

AGRADECIMENTOS

Os meus mais sinceros agradecimentos:

ao orientador e amigo Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira, por sua ajuda, críticas e compreensão, sem as quais esse trabalho não teria sido realizado;

ao LPGA (Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada) pela infraestrutura disponibilizada;

a CAPES pela concessão de bolsa de doutorado e ao Curso de Pós Graduação em Geologia da UFPR pelo apoio;

ao LABAP (Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica) e ao Prof. Fernando Mancini pela oportunidade de participação no Projeto CATEA;

a PETROBRAS, pela cessão dos dados aerogeofísicos;

a Dr^a. Isabella Figueira, uma grande amiga, geóloga, que incentivou esse projeto;

aos amigos geólogos que muito colaboraram nas conversas e discussões MSc. Luís Gustavo de Castro, Dr^a. Ana Paula Soares, MSc. Thais Borba Santos e MSc. Edimar Perico;

ao Dr. Jeferson de Souza, colaborador fundamental nos estudos geofísicos;

aos meus amigos das montanhas;

ao Gilson, meus pais Haroldo e Deize, e minha irmã Claudia, aos quais dedico este trabalho.

RESUMO

Na presente tese foi realizado um estudo multiescala de dados magnéticos, gravimétricos e de sensores remotos da Bacia do Amazonas e das subáreas Tapajós, Xingu e Monte Alegre. Este estudo resultou em proposições de arcabouços geofísico-estruturais, os quais refletem estruturas do embasamento exposto que traspassam a bacia. Foi gerado, inicialmente, um mapa magnético residual a partir da integração de dados de oito levantamentos aerogeofísicos sobre o embasamento exposto e de onze levantamentos sobre a bacia, além de um mapa gravimétrico Bouguer, com base em um único banco de dados. Com o objetivo de facilitar a visualização e a interpretação qualitativa das estruturas geológicas, refletidas nos mapas de campos potenciais, foram aplicados diversos métodos de realce propostos na literatura, além de uma nova técnica desenvolvida durante a pesquisa. O desempenho dos métodos foi avaliado, para diferentes inclinações magnéticas, através de modelos sintéticos 3D obtidos a partir de um programa para geração de anomalias gravimétricas e magnéticas de corpos prismáticos com dimensões, densidades e magnetizações arbitrárias, também elaborado no transcorrer da pesquisa. A integração das informações obtidas através dos diferentes métodos de realce, testados nos modelos sintéticos, possibilitou avançar no conhecimento das estruturas interpretadas a partir dos dados de campos potenciais. Esta interpretação permitiu a delimitação de um arcabouço geofísico integrado para as áreas de estudo, o qual foi corroborado pelas principais feições de superfície, descritas na literatura. Foram realizadas também interpretações semi-quantitativas através do espectro de potência radial e da deconvolução de Euler. A análise dos resultados obtidos a partir dos métodos descritos acima permitiu verificar que o quadro tectônico do embasamento é caracterizado por tendências NW, enquanto o da Bacia do Amazonas revela direções NE. Os lineamentos NE são vinculados as direções do depocentro e das linhas de charneira da bacia, sendo marcadamente segmentados por lineamentos NW. Na subárea Tapajós, verificou-se que as tendências NW, presentes no embasamento e por vezes adentrando a bacia, são mais antigas do que as feições NE e EW. Na subárea Xingu, também se notou a presença de estruturas NW do embasamento que adentram a bacia. Na subárea Monte Alegre, o posicionamento do domo homônimo é controlado pela interseção de tendências NW, NE e NS, interpretadas como zonas de fraqueza do embasamento. Todas as áreas de estudo revelam estimativas de profundidade das estruturas compatíveis com dados da literatura. Interpretações sobre a reativação destas estruturas durante o Fanerozóico permitiram avaliar suas implicações na compartimentação e na evolução tectônica da Bacia do Amazonas.

Palavras chave: Bacia do Amazonas, magnetometria, gravimetria, modelos sintéticos.

ABSTRACT

This thesis presents a multiscale study of magnetic, gravity and remote sensors data, for the Amazon Basin and three sub-areas within it: Tapajós, Xingu and Monte Alegre. The study has allowed proposing geophysical-structural frameworks, which reflect the exposed basement structures that cross the basin. First, a residual magnetic map was generated using eight aerogeophysical databases, over the basement and eleven databases over the basin, as well as, a Bouguer gravity map, generated from a single database. In order to facilitate the visualization and qualitative interpretation of geological structures from the potential field data, several enhancement methods proposed in the literature have been used, as well as, a new enhancing technique developed as part of this work. The performance of each method has been evaluated at different magnetic inclinations using 3D synthetic models generated by a program for calculation of magnetic and gravity anomalies from prismatic bodies having arbitrary dimensions, densities and magnetizations, which was designed in the course of this research. The integrated information obtained by the different enhancement methods, tested on synthetic models, led to an improvement in the knowledge of the geological structures interpreted from the potential-field data. Such a methodology contributed to the elaboration of an integrated geophysical framework for the study areas, which corroborates the main surface features previously reported in the literature. A semi-quantitative interpretation has also been performed using spectral techniques and Euler deconvolution. The results obtained from the methods described above indicate that the tectonic basement framework is characterized by NW tendencies, while on the basin NE directions are dominant. The NE lineaments are approximately parallel to the basin depocenter and the hinge lines, being strongly segmented by NW lineaments. In the Tapajós subarea, it is observed that NW trends, existent in the basement and occasionally entering into the basin, are older than the NE and EW lineaments. In the Xingu subarea it is remarkable the presence of NW basement structures that enter the basin. In the Monte Alegre subarea, the position of the Monte Alegre dome is controlled by intersecting trends in NW, NE and NS directions, which are interpreted as weakness zones in the basement. In all the studied areas, depth estimates for the structures are compatible with the data found in the literature. Finally, reactivation of geological structures during the Phanerozoic and its implication for the tectonic evolution and compartmentalization of the Amazon Basin have been evaluated.

Keywords: Amazon Basin, magnetometry, gravimetry, synthetic models.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1: Mapa de localização da área de estudo na América do Sul indicando as subáreas no contexto da Bacia do Amazonas em modelo digital de elevação SRTM/NASA	5
FIGURA 2 1: Mapa de lineamentos traçados com base nas imagens SRTM em escala 1:800.000 (Fonte: Projeto CATEA).....	7
FIGURA 2 2: Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos na área de estudo (PGW 2007).	8
FIGURA 2 3: Mapa de estações gravimétricas da área de estudo (PGW 2007): em vermelho dados terrestres.....	9
FIGURA 2 4: Mapa do campo magnético residual da área de estudo indicando as subáreas.....	12
FIGURA 2 5: Mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo indicando as subáreas.	12
FIGURA 2 6: Principais métodos de realce de anomalias magnéticas e gravimétricas.....	13
FIGURA 2 7: Efeito da RTP em uma anomalia TMI a partir de uma zona de falha magnetizada.	14
FIGURA 2 8: Disposição das soluções de Euler para vários modelos, indicando suas respectivas qualidades.....	26
FIGURA 3 1: Aplicação dos métodos de realce sobre os modelos gravimétricos de Miller & Singh (1994a).....	28
FIGURA 3 2: Respostas do modelo dique de Verduzco et al. (2004)..	32
FIGURA 3 3: Respostas do modelo bloco de Verduzco et al. (2004)..	32
FIGURA 3 4: Respostas do modelo degrau (step) de Verduzco et al. (2004).....	33
FIGURA 3 5: Representação dos modelos sintéticos 3D.....	35
FIGURA 3 6: Anomalias magnéticas dos prismas geradas a partir do programa GRAV_MAG_PRISMA para o ambiente geomagnético da área de estudo... ..	37
FIGURA 3 7: Mapas do campo magnético anômalo, da amplitude do sinal analítico e do gradiente horizontal total.	39
FIGURA 3 8: Mapas da inclinação do sinal analítico, do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico e da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total	41
FIGURA 3 9: Mapa das soluções de Euler para o modelo dique sobre o campo magnético anômalo.....	42
FIGURA 3 10: Mapa das soluções de Euler para o modelo dique sobre a amplitude do sinal analítico.....	42
FIGURA 4 1: Localização da Bacia do Amazonas no contexto da América do Sul e seu posicionamento paleogeográfico e das bacias intracratônicas brasileiras.....	44
FIGURA 4 2: Mapa das províncias geocronológicas e suas respectivas idades, modificado de Tassinari & Macambira (1999).....	48
FIGURA 4 3: Mapa das províncias geocronológicas e suas respectivas idades, proposto por Santos et al. (2006).....	49

FIGURA 4 4: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas e embasamento, segundo Cunha et al. (1994).....	51
FIGURA 4 5: Blocos crustais da região amazônica no Brasil. Modificado de Costa & Hasui (1997). Área de estudo em preto.....	56
FIGURA 4 6: Lineamentos interpretados por Wanderley Filho (1991)	57
FIGURA 4 7: Arcabouço tectônico proposto por Rezende & Brito (1973).	60
FIGURA 4 8: Arcabouço tectônico da região Amazônica (COSTA et al.,1995).	60
FIGURA 4 9: Mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2004).....	62
FIGURA 4 10: Legenda do mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2004).	63
FIGURA 5.1 1: Mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo	64
FIGURA 5.1 2: Mapas gravimétricos da área de estudo	65
FIGURA 5.1 3: Mapa das principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).....	66
FIGURA 5.1 4: Mapa de interpretação gravimétrica qualitativa indicando as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).	66
FIGURA 5.1 5: Mapa geológico da área de estudo mostrando a possível continuidade de estruturas gravimétricas do embasamento exposto na Bacia do Amazonas.	67
FIGURA 5.1 6: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa grav. Bouguer	68
FIGURA 5.1 7: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo dique.	69
FIGURA 5.1 8: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo pipe.	69
FIGURA 5.1 9: Mapa magnético residual da área de estudo indicando as subáreas Tapajós (verde), Xingu (amarelo) e Monte Alegre (vermelho) no contexto da Bacia do Amazonas (limites em preto).	70
FIGURA 5.1 10: Mapa magnético residual RTP da área de estudo.....	71
FIGURA 5.1 11: Mapas magnéticos da área de estudo	72
FIGURA 5.1 12: Mapa magnético residual RTP indicando as principais províncias da área de estudo.....	73
FIGURA 5.1 13: Mapa de interpretação magnética qualitativa indicando as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).	74
FIGURA 5.1 14: Mapa geológico da área de estudo mostrando a possível continuidade de estruturas magnéticas do embasamento exposto na Bacia do Amazona.....	74
FIGURA 5.1 15: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual. .	75
FIGURA 5.1 16: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo contato. ...	76
FIGURA 5.1 17: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo dique.	77
FIGURA 5.1 18: Mapa de interpretação gravimétrica-magnética qualitativa com as principais feições tectônicas da B.Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).	78
FIGURA 5.1 19: Mapa geológico da área de estudo mostrando a possível continuidade de estruturas gravimétricas e magnéticas no embasamento exposto da Bacia do Amazonas.....	79
FIGURA 5.2 1: Localização e acessos da subárea Tapajós.	82
FIGURA 5.2 2: Mapa geológico da subárea Tapajós (CPRM, 2008).	83
FIGURA 5.2 3: Imagem SRTM com pseudo-iluminação de 45º.....	84

FIGURA 5.2 4: Lineamentos interpretados em escala 1:800.000. Fonte: Santos (2009).	84
FIGURA 5.2 5: Lineamentos interpretados em escala 1:200.000. Fonte: Santos (2009).	85
FIGURA 5.2 6: Mapa magnético residual da subárea Tapajós	85
FIGURA 5.2 7: Mapa da Bacia do Amazonas com as estruturas de tectônica de cisalhamento e associadas. Modificado de Rezende & Brito (1973).	89
FIGURA 5.2 8: Lineamentos de direção NW interpretados por Wanderley Filho (1991)	89
FIGURA 5.2 9: Mapa estrutural do Estado do Pará (CPRM, 2008) e sistema de falhas transcorrentes de Urucará (Costa, 2002)	90
FIGURA 5.2 10: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos estruturais da subárea na escala 1:800.000.	91
FIGURA 5.2 11: Mapa magnético residual da subárea Tapajós reduzido ao polo (RTP)	93
FIGURA 5.2 12: Bloco diagrama da subárea Tapajós	94
FIGURA 5.2 13: Mapas magnéticos da subárea Tapajós	96
FIGURA 5.2 14: Mapas magnéticos da subárea Tapajós	97
FIGURA 5.2 15: Mapas magnéticos da subárea Tapajós	98
FIGURA 5.2 16: Mapas magnéticos da subárea Tapajós	99
FIGURA 5.2 17: Mapa de lineamentos magnéticos da subárea Tapajós.....	100
FIGURA 5.2 18: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos geofísicos da subárea.	100
FIGURA 5.2 19: Mapa de lineamentos magnéticos e de estruturas definidas por vários autores.....	101
FIGURA 5.2 20: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual.	102
FIGURA 5.2 21: Mapa das soluções de Euler da subárea Tapajós para o modelo dique. .	104
FIGURA 5.2 22: Mapa das soluções de Euler da subárea Tapajós para o modelo contato.	104
FIGURA 5.2 23: Mapa dos lineamentos SRTM e magnéticos.	106
FIGURA 5.2 24: Mapa dos lineamentos SRTM e magnéticos indicando as faixas estruturais.....	106
FIGURA 5.3 1: Mapa de localização e acessos à subárea Xingu.	107
FIGURA 5.3 2: Mapa geológico da subárea Xingu (CPRM, 2008).....	108
FIGURA 5.3 3: Imagem SRTM com pseudo-iluminação de 45°.	109
FIGURA 5.3 4: Lineamentos interpretados em escala 1:800.000. Fonte: Perico (2009). ...	109
FIGURA 5.3 5: Lineamentos interpretados em escala 1:200.000. Fonte: Perico (2009). ...	110
FIGURA 5.3 6: Mapa magnético residual da subárea Xingu.....	110
FIGURA 5.3 7: Lineamentos regionais no contexto da subárea Xingu	113
FIGURA 5.3 8: Diagramas de rosetas de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos estruturais da subárea Xingu.	116
FIGURA 5.3 9: Mapa magnético residual da subárea Xingu reduzido ao polo (RTP).....	118
FIGURA 5.3 10: Bloco diagrama da subárea Xingu.	119
FIGURA 5.3 11: Mapas magnéticos da subárea Xingu.....	121
FIGURA 5.3 12: Mapas magnéticos da subárea Xingu.....	122

FIGURA 5.3 13: Mapas magnéticos da subárea Xingu.....	123
FIGURA 5.3 14: Mapas magnéticos da subárea Xingu.....	124
FIGURA 5.3 15: Mapa de lineamentos magnéticos da subárea Xingu.	125
FIGURA 5.3 16: Diagramas de rosetas de comprimento (esquerda) e frequência (direita) acumulados dos lineamentos geofísicos da subárea Xingu.....	125
FIGURA 5.3 17: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual.	126
FIGURA 5.3 18: Mapa das soluções de Euler da subárea Xingu para o modelo dique.	127
FIGURA 5.3 19: Mapa das soluções de Euler da subárea Xingu para o modelo contato...	128
FIGURA 5.3 20: Mapa dos lineamentos SRTM e magnéticos da subárea Xingu	130
FIGURA 5.3 21: Mapa dos lineamentos SRTM e magnéticos indicando as faixas estruturais.....	130
FIGURA 5.4 1: Localização e acesso à subárea de Monte Alegre estado do Pará.	133
FIGURA 5.4 2: Mapa geológico da subárea de Monte Alegre (CPRM, 2008).	134
FIGURA 5.4 3: Imagem SRTM com pseudo-iluminação de 45°.....	135
FIGURA 5.4 4: Lineamentos interpretados em escala 1:800.000. Fonte: Figueira (2009)..	135
FIGURA 5.4 5: Lineamentos interpretados em escala 1:200.000. Fonte: Figueira (2009)..	136
FIGURA 5.4 6: Mapa magnético residual da subárea Monte Alegre.....	136
FIGURA 5.4 7: Mapa gravimétrico Bouguer da subárea Monte Alegre.....	137
FIGURA 5.4 8: Diagramas de roseta para comprimento e frequência acumulados dos lineamentos estruturais da subárea Monte Alegre.	142
FIGURA 5.4 9: Mapa magnético residual da subárea Monte Alegre (RTP)	143
FIGURA 5.4 10: Bloco diagrama da subárea Monte Alegre.....	144
FIGURA 5.4 11: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre (A).....	147
FIGURA 5.4 12: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre.....	148
FIGURA 5.4 13: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre.....	149
FIGURA 5.4 14: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre.....	150
FIGURA 5.4 15: Mapa de lineamentos magnéticos da subárea Monte Alegre.	151
FIGURA 5.4 16: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos magnéticos da subárea.....	151
FIGURA 5.4 17: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual.	152
FIGURA 5.4 18: Mapa das soluções de Euler para o modelo dique.	153
FIGURA 5.4 19: Mapa das soluções de Euler para o modelo contato.	154
FIGURA 5.4 20: Mapas gravimétricos da subárea Monte Alegre.....	156
FIGURA 5.4 21: Mapas gravimétricos da subárea Monte Alegre.....	157
FIGURA 5.4 22: Mapa de lineamentos gravimétricos da subárea Monte Alegre.	158
FIGURA 5.4 23: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos geofísicos da subárea.	158
FIGURA 5.4 24: Mapa residual de 3° grau indicando os altos grav. (MA1 a MA4)	159
FIGURA 5.4 25: Mapa de interpretação qualitativa da região de Monte Alegre.....	160

FIGURA 5.4 26: Mapa gravimétrico residual de 3° grau indicando as soluções de Euler para o modelo pipe (SI=1)	161
FIGURA 5.4 27: Mapa gravimétrico residual de 3° grau indicando as soluções de Euler para o modelo esfera (SI=2)	161
FIGURA 5.4 28: Mapa indicativo da reentrância das formações paleozóicas da Bacia do Amazonas, na subárea Monte Alegre	162
FIGURA 5.4 29: Mapa dos lineamentos SRTM, magnéticos e gravimétricos	163
FIGURA 5.4 30: Mapa dos lineamentos SRTM, magnéticos e gravimétricos indicando as faixas estruturais	163

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1: Especificações dos levantamentos aerogeofísicos da CPRM na área de estudo (modificado de PGW, 2007).	8
TABELA 2-2: Especificações dos levantamentos aeromagnéticos da Petrobras na área de estudo (modificado de PGW, 2007).	9
TABELA 2-3: Corpos magnéticos e respectivos índices estruturais.	26
TABELA 2-4: Corpos gravimétricos e respectivos índices estruturais.	26
TABELA 3-1: Parâmetros do campo geomagnético das cidades de Curitiba e Santiago.	29
TABELA 3-2: Parâmetros geométricos dos modelos (FIGURA 4-5).	35
TABELA 3-3: Parâmetros magnéticos dos modelos (FIGURA 4-5).	36

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A presente Tese de Doutorado foi desenvolvida no contexto do Projeto *Caracterização estrutural do embasamento da Bacia do Amazonas e implicações para reativações de falhas durante o Fanerozóico* - CATEA, o qual foi realizado no triênio 2007/2009 e teve apoio financeiro da Petrobras através do Programa Tecnológico de Fronteiras Exploratórias – PROFEX, Rede de Estudos Geotectônicos – GEOTEC. Tal projeto compreendeu a análise multiescala da Bacia do Amazonas, por meio do estudo de imagens aerogeofísicas e de sensores remotos, além de dados de campo e petrográficos.

Os dados geofísicos utilizados na pesquisa, gravimétricos e magnéticos, são largamente aplicados no reconhecimento geológico de bacias sedimentares, sobretudo naquelas que ocupam grandes áreas, como a Bacia do Amazonas, cujo conhecimento é limitado pela escassez de acessos, afloramentos e perfurações, além da densa cobertura vegetal, a qual oculta as feições de relevo e dificulta as interpretações geológicas.

O estudo da evolução das bacias sedimentares brasileiras é de grande interesse, pois propicia investigar os processos e sugerir possíveis tratamentos geradores/acumuladores de recursos energéticos (hidrocarbonetos). Neste contexto, a geofísica constitui ferramenta importante para o estudo da evolução tectônica, do delineamento estrutural e do modelamento do arcabouço da Bacia do Amazonas.

Assim, dados aeromagnéticos e gravimétricos disponíveis na Universidade Federal do Paraná – UFPR foram processados e interpretados, com base em vários métodos de realce de anomalias e métodos de estimativas de profundidades de fontes (e.g. deconvolução de Euler). Portanto, a pesquisa visou delinear o arcabouço geofísico e cotejá-lo às principais estruturas regionais, de uma área com cerca de

1.200.000 km² (Figura 1-1) e de três subáreas denominadas Tapajós, Xingu e Monte Alegre, localizadas nos estados do Pará e Amazonas.

Durante todo o período da pesquisa notou-se a necessidade de um melhor conhecimento da resposta do sinal magnético em diferentes posições da Terra. Para tanto, foi desenvolvido o programa GRAV_MAG_PRISMA (BONGIOLO, *et al.* 2011a), que gera anomalias sintéticas derivadas de modelos prismáticos (3D), visando subsidiar a interpretação magnética qualitativa.

Sobre os modelos sintéticos foram aplicadas várias técnicas de realce de anomalias, incluindo um novo método desenvolvido, também durante a pesquisa, denominado inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total - ISA_GHT (FERREIRA, *et al.* 2010).

1.2 OBJETIVOS E METAS DO TRABALHO

O objetivo principal é:

1. Caracterizar o arcabouço geofísico-estrutural das áreas de interesse, com base no processamento e na interpretação qualitativa e semi-quantitativa de dados gravimétricos e magnéticos disponíveis;

Os objetivos secundários são:

- 1.1 Realizar estimativas de profundidades das fontes magnéticas e gravimétricas;
- 1.2 Testar técnicas de realce e códigos para análise estrutural de dados geofísicos.

Para alcançar estes objetivos foram estabelecidas as seguintes metas:

- a. Análise bibliográfica e compilação de dados, documentos e produtos sobre a Bacia do Amazonas e seu embasamento (oculto e exposto), além das três subáreas selecionadas;
- b. Compilação dos dados gravimétricos e magnéticos disponíveis;
- c. Análise crítica e geração do banco de dados geofísico e geológico da área de estudo e das subáreas;
- d. Geração dos mapas aeromagnético residual e gravimétrico Bouguer da área de estudo e das subáreas;
- e. Processamento e desenvolvimento de métodos de realce de anomalias gravimétricas e magnéticas;
- f. Desenvolvimento de programa para geração de modelos prismáticos sintéticos que permitem melhor entendimento do sinal magnético em diferentes locais da Terra;
- g. Interpretação qualitativa preliminar dos dados gravimétricos e magnéticos, discriminando os principais lineamentos e compartimentos;
- h. Geração do arcabouço geofísico integrado (gravimétrico e magnético);
- i. Aplicação de métodos estatísticos de discriminação de profundidades de fontes gravimétricas e magnéticas;
- j. Interpretação do arcabouço geofísico e integração aos dados geológico-estruturais disponíveis em Sistema de Informação Geográfica (SIG), onde todas as análises espaciais e a interpretação das relações entre as variáveis foram procedidas.

1.3 LOCALIZAÇÕES DA ÁREA DE ESTUDO E DAS TRÊS SUBÁREAS

A área de estudo envolve a maior parte da Bacia do Amazonas e porções contíguas, meridional e setentrional, de seu embasamento exposto, conforme indicado na Figura 1-1. A área perfaz 1.200.000 km², sendo limitada pelas seguintes coordenadas geodésicas: -60°00' e -50°00' de longitude Oeste e 00°00' e -08°00' de latitude Sul. As três subáreas selecionadas para aplicação dos processamentos geofísicos são apresentadas na Figura 1-1, sobre o modelo digital de elevação, com dados do SRTM 90 (*Shuttle Radar Topography Mission – NASA*), diferenciadas por cores: Tapajós (27.000 km², verde), Xingu (27.000 km², amarelo) e Monte Alegre (30.000 km², vermelho). As áreas foram escolhidas em virtude do conhecimento anterior sobre a qualidade das seções sedimentares e estruturas expostas e possibilidade de acesso, considerando-se sua representatividade para caracterizar a reativação fanerozóica de falhas herdadas do embasamento.

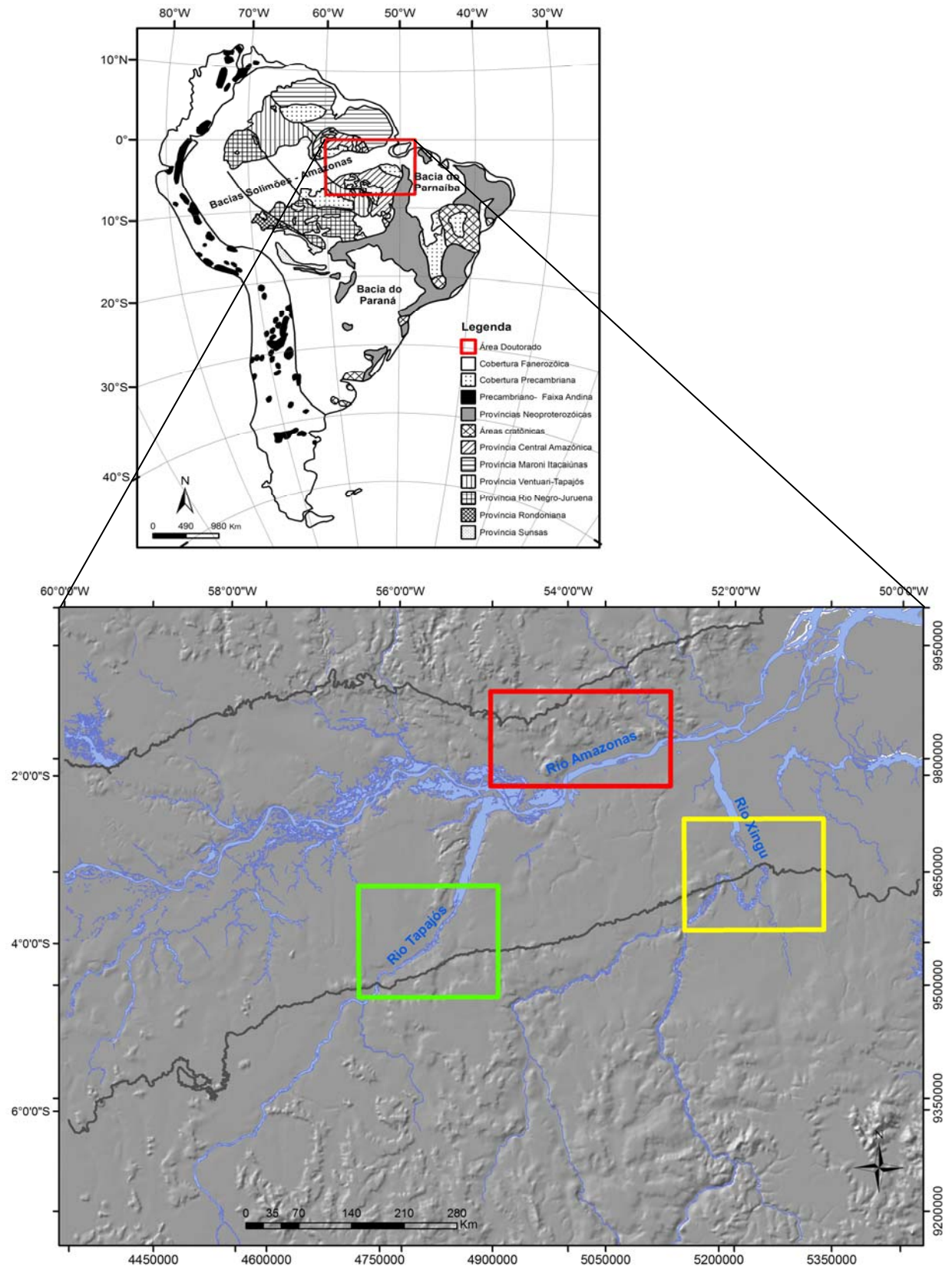


Figura 1-1: Mapa de localização da área de estudo na América do Sul (painel superior) indicando as subáreas (polígonos, painel inferior) Tapajós (verde), Xingu (amarelo) e Monte Alegre (vermelho) no contexto da Bacia do Amazonas (limites em preto), em modelo digital de elevação SRTM/NASA.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho, em sua fase inicial, consistiu na análise bibliográfica e compilação de documentos e mapas disponíveis na literatura da Bacia do Amazonas e do seu embasamento, como estratigrafia, sedimentologia, geologia estrutural, geocronologia, petrografia, geofísica, sensoriamento remoto e paleontologia, além de trabalhos mais abrangentes referentes a paleogeografia e evolução geotectônica.

Foram verificados artigos em livros, periódicos nacionais e internacionais, trabalhos completos, resumos expandidos e resumos em congressos e simpósios nacionais e internacionais, teses de doutorado e dissertações de mestrado e projetos de levantamentos geológicos impressos e em meio digital. Tais documentos foram organizados em um banco de dados.

Todo o acervo analógico reunido nesta etapa do projeto (e.g. mapas, imagens, dados de campo e interpretações) foi digitalizado, georreferenciado, vetorizado e, posteriormente, armazenado em SIG (Sistema de Informação Geográfica), com auxílio do *software* ArcGis™. O SIG é um sistema computacional que permite armazenar e integrar informações georreferenciadas de diferentes fontes e escalas.

2.1 MAPAS BASE

Como mapas-base foram compilados dados de elevação do terreno do satélite SRTM (pixels de 90 metros) obtidos no site do *United States Geological Services* – USGS (Capítulo 1 – Figura 1-1), mapas geológicos do Serviço Geológico do Brasil - CPRM em escala 1:1.000.000 (Capítulo 4 – Figura 4-9), bem como mapas de lineamentos, interpretados com base nas imagens SRTM (Figura 2-1) durante a fase do projeto CATEA, em quatro direções de iluminação diferentes: 0°, 45°, 90° e 315°.

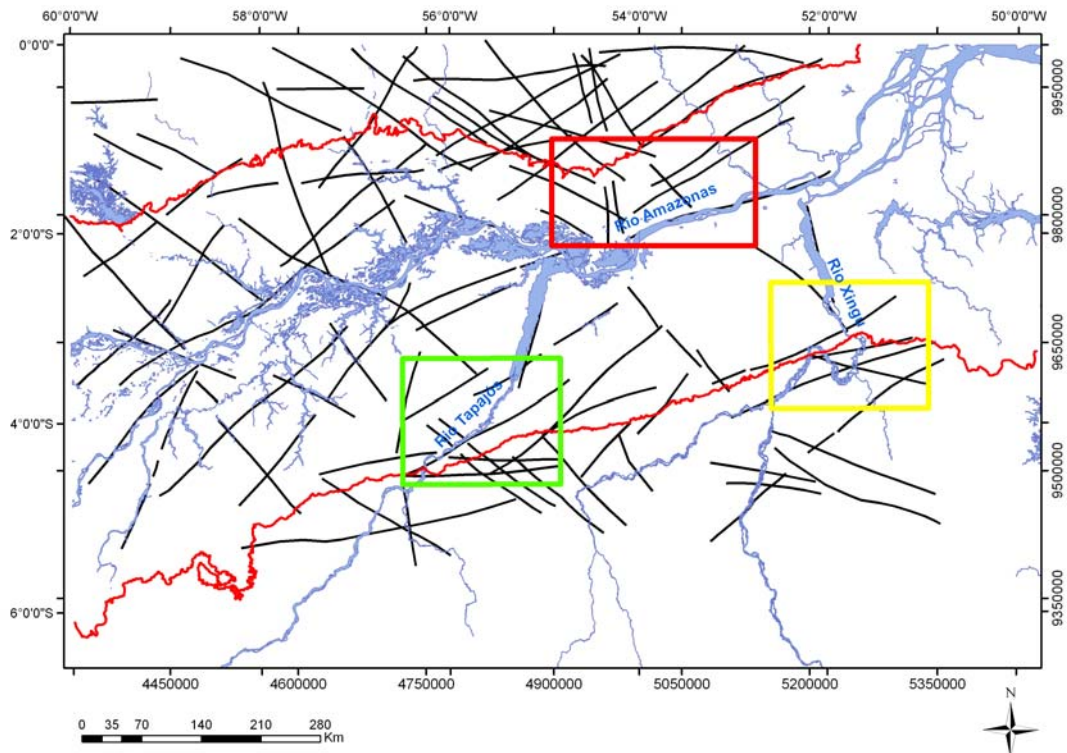


Figura 2-1: Mapa de lineamentos traçados com base nas imagens SRTM em escala 1:800.000 (Fonte: Projeto CATEA). Em destaque as três subáreas de estudo (vermelho, verde e amarelo) e o limite da bacia (vermelho).

2.2 FONTES DOS DADOS AEROMAGNÉTICOS

A área do estudo integra uma série de levantamentos aerogeofísicos realizados pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e pela Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A). Conforme compilação realizada pela PGW (Peterson, Grant & Watson) do Brasil Ltda. (PGW, 2007), na área de estudo (Figura 2-2), os dados aeromagnéticos envolvem tanto o **embasamento exposto** (nº 1030, 1041, 1019, 1020, 1047, 1048, 1050, 1051) quanto a **Bacia do Amazonas** (nº 4003, 4006, 4013, 4026, 4022, 4032, 4034, 4037, 4038, 4039, 4063). A Tabela 2-1 e a Tabela 2-2 mostram as especificações dos levantamentos realizados pela CPRM e pela Petrobras, respectivamente.

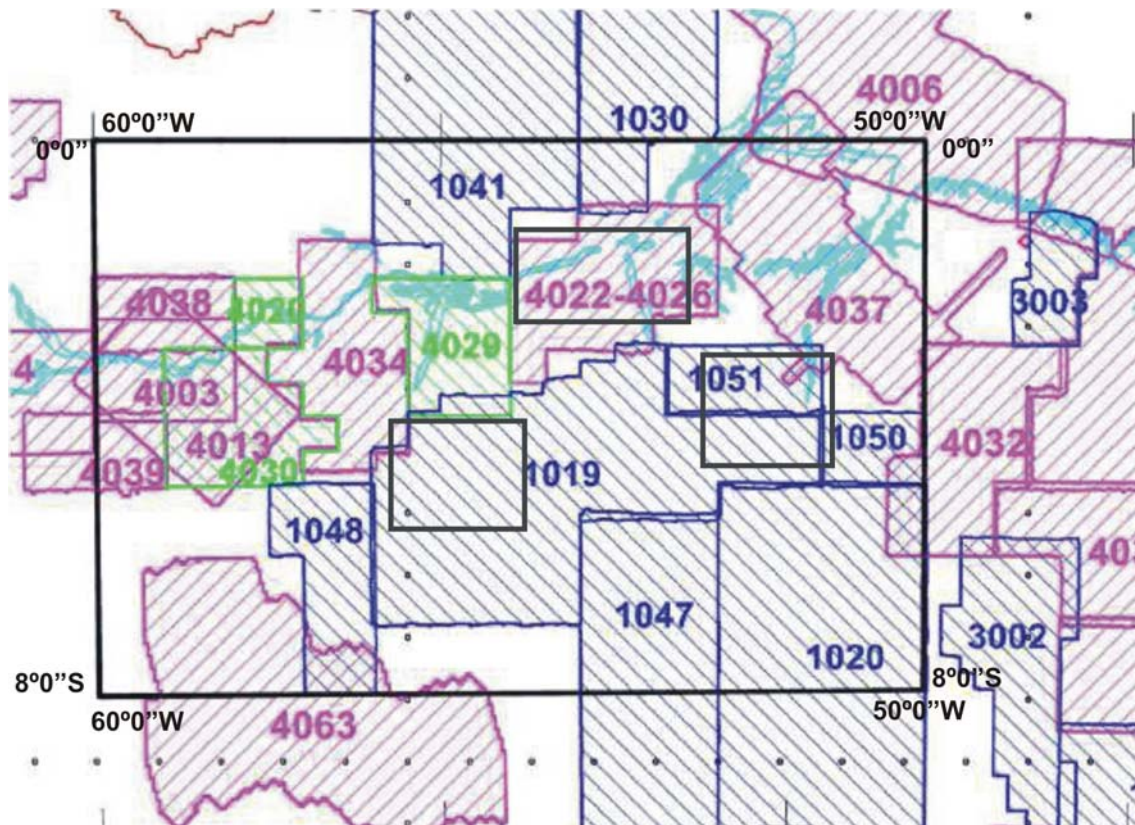


Figura 2-2: Mapa de localização dos projetos aerogeofísicos na área de estudo (PGW 2007): em preto área e subáreas de estudo; em azul (série 1000) dados magnéticos e gamaespectrométricos do embasamento exposto (CPRM); em magenta (série 4000) dados magnéticos da Bacia do Amazonas (Petrobras); em verde (série 4000) dados magnéticos da Bacia do Amazonas (Petrobras) disponibilizados em malhas regulares com resolução de 20x20 km.

Tabela 2-1: Especificações dos levantamentos aerogeofísicos (gamaespectrométricos e magnéticos) da CPRM na área de estudo (modificado de PGW, 2007).

CPRM	PROJETO	DATA	ESPAÇAMENTO DAS LINHAS (m)	ALTURA DE VÔO (m)	ALTURA CONSTANTE	TAMANHO DA CÉLULA (m)	LINHAS DISPONÍVEIS	LINHAS (TOTAL) (km)	ÁREA DO PROJETO (%)	LINHAS NO PROJETO (km)
1019	Sul do Pará	1974	1000	150	Sim	200	Sim	56.517	100	56.517
1020	Goiás/Tocantins	1975	1000	150	Sim	200	Sim	273.41	30	82.023
1030	Jari rio Negro (1)	1976	2000	150	Sim	400	Sim	52.612	15	7.892
1041	Jari rio Negro (2)	1978	2000	150	Sim	400	Sim	78.517	35	27.481
1047	Carajás (1)	1986	2000	150	Sim	400	Sim	62.214	55	34.218
1048	Médio Tapajós	1987	2000	150	Sim	400	Sim	24.478	100	24.478
1050	Carajás (2)	1987	2000	150	Sim	400	Sim	10.480	100	10.480
1051	Carajás (3)	1987	2000	150	Sim	400	Sim	15.604	100	15.604
TOTAL								573.833		258.693

Tabela 2-2: Especificações dos levantamentos aeromagnéticos da Petrobras na área de estudo (modificado de PGW, 2007).

PETROBRAS	PROJETO	DATA	ESPAÇAMENTO DAS LINHAS (m)	ALTURA DE VOÔ (m)	ALTITUDE CONSTANTE	TAMANHO DA CÉLULA	LINHA DISPONÍVEL	LINHAS TOTAL (KM)	ÁREA DO PROJETO (%)	LINHAS NO PROJETO (km)
4003	Manaus-Leste	1957	1500	400	Sim	500	Não	34.000	100	34.000
4006	Pará-Amapá	1968	4000	700	Sim	1000	Não	31.397	10	3.140
4013	Médio-Amazonas	1973	5000	800	Sim	1000	Sim	14.643	95	13.911
4026/22	Gurupá	1981	3000	800	Sim	600	Sim	28.281	100	28.281
4032	Pindaré	1983	2000	700	Sim	400	Sim	36.999	10	3.700
4034	Maués	1984	3000	800	Sim	600	Sim	21.536	100	21.536
4037	Marajó	1984	6000	500	Sim	1200	Sim	19.726	85	16.767
4038	Médio Amazonas 1	1985	2000	?	?	400	Sim	16.720	100	16.720
4039	Médio Amazonas 2	1985	2000	?	?	400	Sim	16.610	50	8.305
4063	Bacia Alto Tapajós	1995	25000	1060	Sim	5000	Sim	6.425	40	2.570
Total								226.337		148.930

2.3 FONTES DOS DADOS GRAVIMÉTRICOS

De acordo com a Figura 2-3, os dados gravimétricos terrestres são praticamente restritos à Bacia do Amazonas, na forma de uma única malha regular de 2x2 km, os quais foram disponibilizados pela PGW (2007).

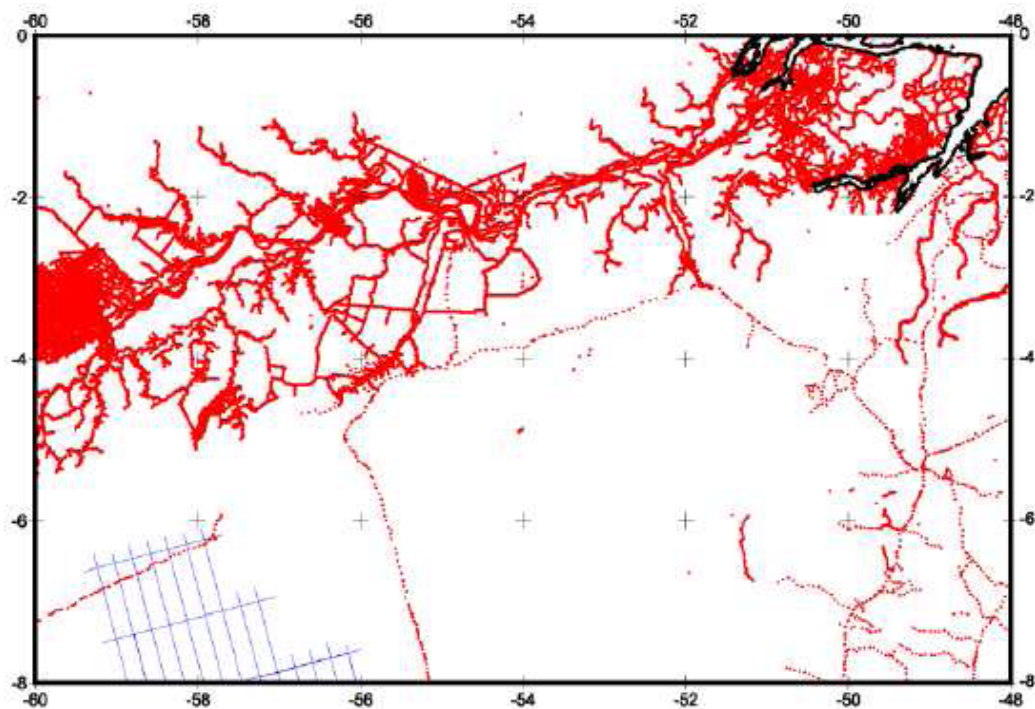


Figura 2-3: Mapa de estações gravimétricas da área de estudo (PGW 2007): em vermelho dados terrestres.

2.4 PRÉ-PROCESSAMENTO

Nesta etapa, o banco de dados, em formato de arquivo xyz, foi importado para o software Oasis Montaj™, onde os levantamentos foram selecionados e homogeneizados para uma altura de voo de 1.000 metros, a partir dos quais foi recortada a área de interesse para o estudo. Em seguida foram realizados testes visuais para avaliar suas características e iniciar o procedimento de construção de malhas regulares, com o intuito de eliminar os artefatos e anomalias espúrias ao longo das linhas de voo.

2.4.1 Análise crítica e geração do mapa magnético residual

Os dados magnéticos residuais da área de estudo (já subtraídos do IGRF e recortados dos referidos projetos) foram processados a partir do formato digital xyz (ASC II), o qual organiza as informações hierarquicamente, primeiro por linhas de voo, depois por pontos de medição. A partir deste formato os valores foram interpolados através do método da curvatura mínima (BRIGGS, 1974), para a geração de uma malha regular de 1.000x1.000 metros.

2.4.1.1 Micronivelamento

O termo micronivelamento se refere à remoção de quaisquer erros residuais que persistam após as práticas normais de nivelamento. Tais erros residuais são representados usualmente como artefatos de altas frequências paralelos às linhas do levantamento e podem ser amplificados durante o processamento de imagens e

na aplicação de técnicas de realce. Para correção destes erros foi aplicada a técnica de micronivelamento implementada por Geosoft™ (2003).

Por meio deste método de micronivelamento, inicialmente, é gerado um canal de correção, que é adicionado ao banco de dados. Esta correção é então subtraída dos dados originais visando à obtenção da malha final micronivelada. A técnica de micronivelamento utilizada (GEOSOFT™, 2003) foi considerada satisfatória, em relação a outros métodos, como o da decorrução, também testado, por melhor distinguir os ruídos do sinal geológico nas linhas de vôo, podendo, portanto, removê-los sem causar uma perda acentuada dos sinais.

A técnica de micronivelamento empregada assume que a malha gerada é produto da geologia, do campo regional e de erros de nivelamento. Estas anomalias espúrias são separadas após vários estágios de filtragem e depois subtraídas dos dados originais.

O mapa magnético residual desta forma micronivelado é apresentado na Figura 2-4, sombreado na direção NE-SW.

2.4.2 Análise crítica e geração do mapa gravimétrico Bouguer

Os dados gravimétricos foram também interpolados através do método da curvatura mínima (BRIGGS, 1974), para a geração de uma malha regular de 1.000x1.000 metros, resultando no mapa gravimétrico Bouguer (Figura 2-5), o qual é praticamente restrito a Bacia do Amazonas.

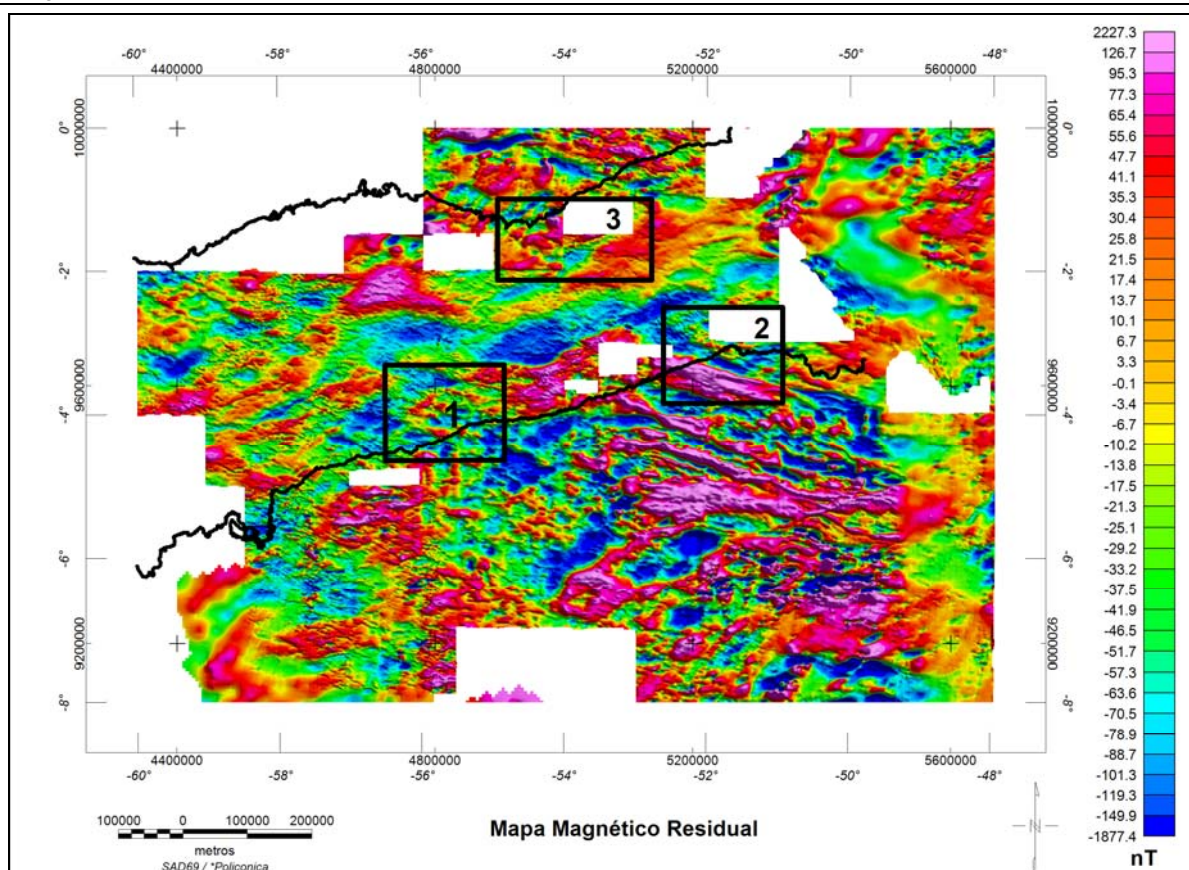


Figura 2-4: Mapa do campo magnético residual da área de estudo indicando as subáreas Tapajós (1), Xingu (2) e Monte Alegre (3) no contexto da Bacia do Amazonas (limites em preto).

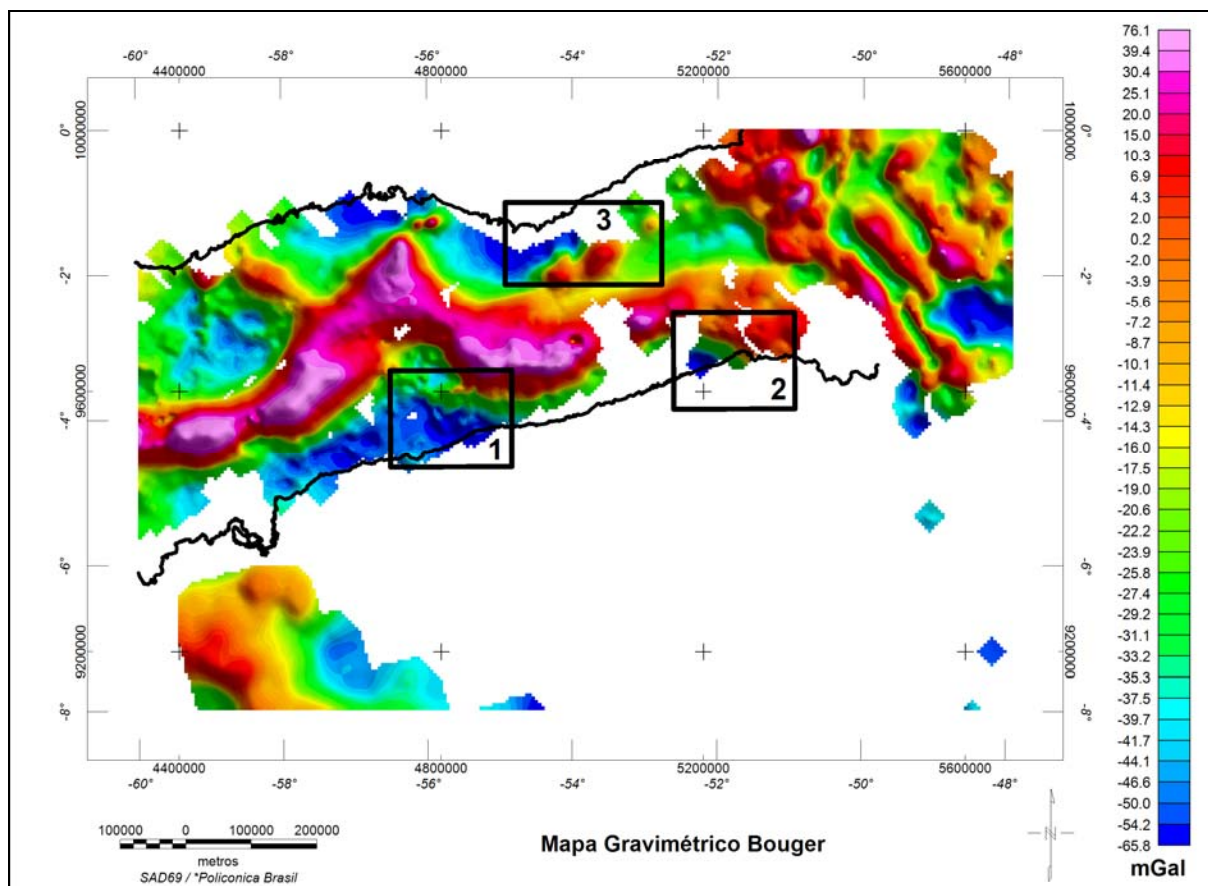


Figura 2-5: Mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo indicando as subáreas Tapajós (1), Xingu (2) e Monte Alegre (3). Limites da Bacia do Amazonas em preto.

2.5 PROCESSAMENTO QUALITATIVO - PRINCIPAIS MÉTODOS DE REALCE DE ANOMALIAS

Neste capítulo serão apresentadas as principais técnicas de processamento adotadas na presente pesquisa para realçar anomalias gravimétricas e magnéticas. A Figura 2-6 representa as equações correspondentes a cada método de realce em relação aos campos potenciais, incluso o método da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT), desenvolvido durante a pesquisa.

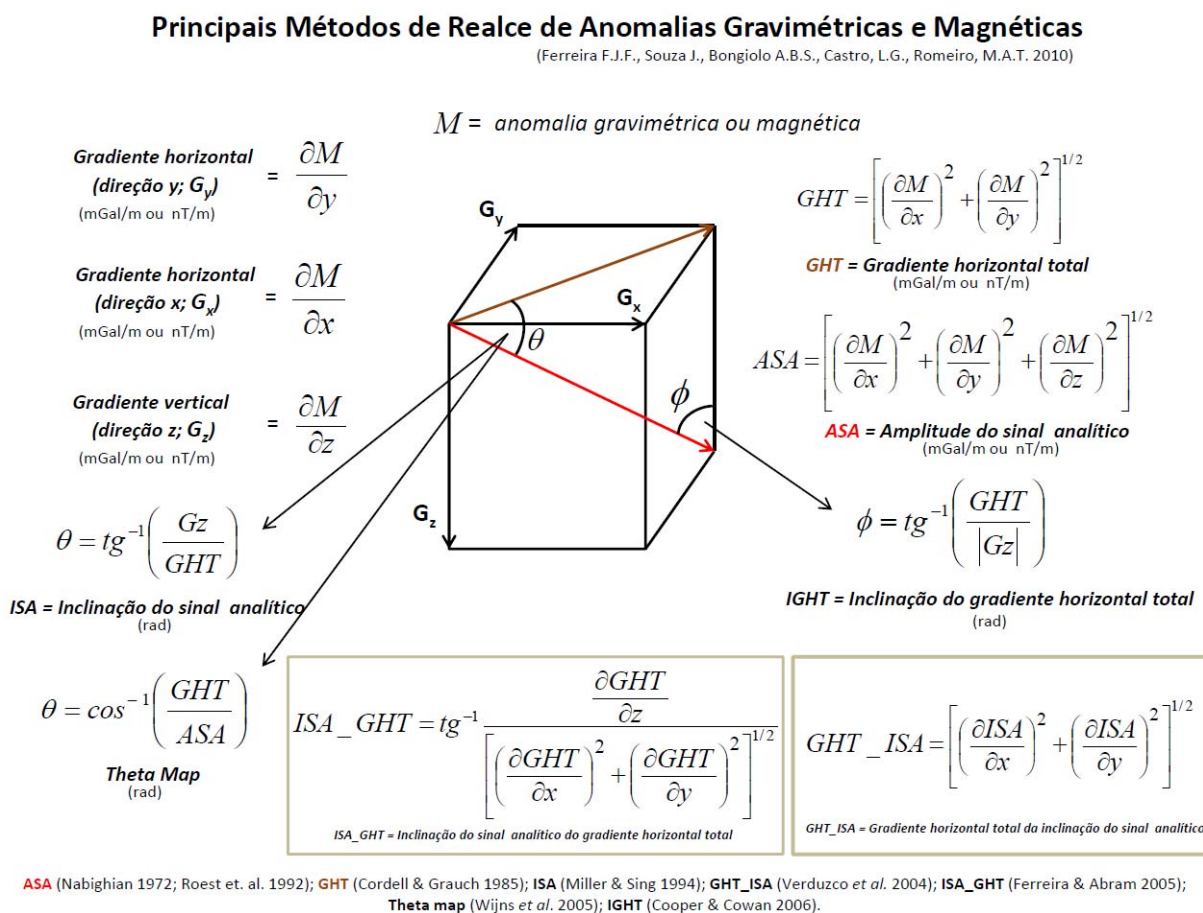


Figura 2-6: Principais métodos de realce de anomalias magnéticas e gravimétricas.

2.5.1 Redução ao polo

A redução ao polo (RTP) é uma técnica de processamento que recalcula os dados do campo magnético total como se o campo magnético induzido (TMI) atuasse com uma inclinação de 90° (Figura 2-7). A RTP transforma anomalias

magnéticas dipolares em anomalias monopolares centralizadas sobre seus corpos causativos, as quais podem simplificar a interpretação dos dados. A RTP faz a simples associação de que as rochas na área de pesquisa são todas magnetizadas paralelas ao campo magnético da Terra, ou seja, no polo.

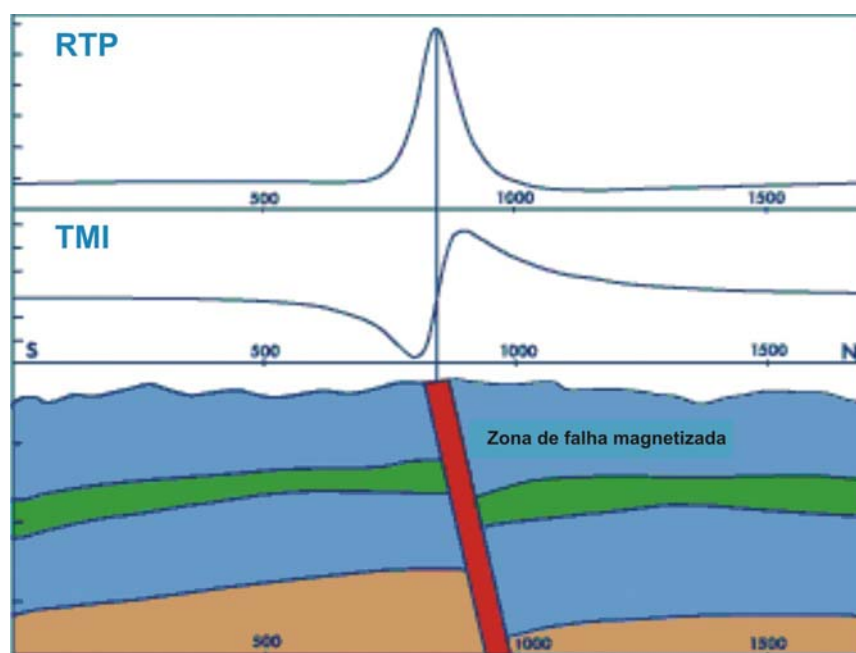


Figura 2-7: Efeito da RTP em uma anomalia TMI a partir de uma zona de falha magnetizada. Fonte: The University of Oklahoma

O filtro RTP, necessário para o processamento de dados geofísicos, tem a propriedade de situar às anomalias o mais próximo possível das fontes magnéticas que as causaram, independente da sua posição no globo terrestre, ou seja, da inclinação e declinação no local.

O objetivo do filtro é tornar as anomalias únicas, ou seja, sem os pares positivos e negativos, tais como o campo pareça como no polo magnético, pois a diferentes latitudes e declinações magnéticas a forma das anomalias muda (SPECTOR & GRANT, 1970).

Este filtro é aplicado no domínio de Fourier e migra o campo observado da inclinação e da declinação magnéticas do local do levantamento, para que o campo pareça tal como no polo magnético. Este fato ajuda a interpretação, visto que qualquer assimetria do campo reduzido ao polo pode ser atribuída à geometria da fonte e/ou às suas propriedades magnéticas. Uma limitação do filtro é que ele pode

introduzir ruídos para a malha resultante onde existam altas frequências e também na direção da inclinação e declinação do campo no local do levantamento.

Cabe ressaltar que a presença de magnetização remanescente quase sempre modifica os resultados, em qualquer caso (BLUM, 1999).

2.5.2 Continuações ascendentes

Como sabido, o procedimento de continuação ascendente simula a aquisição dos dados do campo magnético e gravimétrico em níveis superiores ao original (mais afastados das fontes), removendo, ou pelo menos minimizando, os sinais de fontes rasas e ruídos.

A continuação ascendente é considerada um filtro de “limpeza”, por não produzir quase nenhum efeito de borda. Frequentemente, é utilizado para remover ou minimizar sinais de fontes rasas e ruídos. Efetivamente, corresponde a uma suavização e é bastante empregado para comparar dados magnéticos e gravimétricos tomados a diferentes altitudes.

Gunn (1975) propôs uma representação espectral geral para campos potenciais, cuja expressão é:

$$M_f(u,v,o) = 2\pi \cdot D_1(u,v) \cdot D_2(u,v) \cdot I(u,v) \cdot m_s(u,v,h) \cdot H(u,v,h)$$

onde:

2π é um fator escalar;

D_1 é um fator para a direção da magnetização;

D_2 é um fator para a direção de medida;

m_s é um equivalente ao fator de estrato (incorpora a forma dos corpos fonte de anomalias);

I é um fator de distinção entre campos magnéticos e gravimétricos e,

$H = e^{-h(u^2 + v^2)^{1/2}}$ é um fator da profundidade.

O importante nesta equação é que, no domínio da frequência, a intensidade magnética é definida por simples multiplicações dos fatores relacionados à profundidade das fontes, formato dos corpos, direção da magnetização e latitude

magnética. Por exemplo, a multiplicação do espectro de um campo por um fator $H = e^{-h(u^2 + v^2)^{1/2}}$ transforma-o em um espectro de um campo medido a uma distância h acima do plano de observação original. Através da transformada inversa de Fourier, os dados no domínio da frequência retornam ao domínio do espaço, possibilitando visualizar os resultados obtidos.

2.5.3 Gradiente vertical (G_z) – Evjen (1936)

A primeira derivada vertical ou gradiente vertical é fisicamente equivalente à medição simultânea do campo magnético ou gravimétrico em dois pontos dispostos verticalmente e separados por uma distância qualquer. O resultado é obtido pela diferença das medidas nos mencionados pontos, dividido pela separação entre eles. Portanto, tal filtro realça as altas frequências, em detrimento das baixas, eliminando os efeitos regionais, de longos comprimentos de onda, derivados de fontes profundas. Unidades: nT/m ou mGal/m.

2.5.4 Gradientes horizontais (G_x ; G_y) – Cordell & Grauch (1985)

Estes filtros possuem funções semelhantes ao anterior, sendo, entretanto, aplicados nas direções horizontais x e y . Unidades: nT/m ou mGal/m.

2.5.5 Gradiente horizontal total (GHT) – Cordell & Grauch (1985)

O cálculo das derivadas horizontais do campo magnético ou gravimétrico permite uma análise da geometria da superfície da malha regular, indicando mudanças abruptas no declive destes campos potenciais, que podem ser ocasionadas por um salto no valor médio ou pela presença de um pico nos dados. São baseados nos resultados da declividade (primeira derivada) ou na taxa da mudança do gradiente (segunda derivada). Permitem, através da malha resultante, identificar mudanças abruptas em tais campos, obtendo-se bons resultados na

cartografia geológica. O gradiente horizontal total de ordem zero é o vetor resultante das combinações das primeiras derivadas horizontais nas direções x e y (Figura 2-6) dado pela equação a seguir:

$$\text{GHT (x,y)} = \left[\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ Unidade = nT/m; mGal/m.}$$

onde: $\partial M / \partial x$ e $\partial M / \partial y$ correspondem às derivadas horizontais da anomalia M do campo magnético e gravimétrico.

Este processo envolve uma transformação de fase e um realce das altas frequências. A transformação de fase resalta os picos das anomalias, localizados aproximadamente sobre as bordas de corpos espessos, e o realce da alta frequência proporciona um estreitamento destes picos para aumentar a definição das bordas dos corpos (MILLIGAN & GUNN, 1997).

O gradiente horizontal total, em geral, é utilizado para realçar os limites dos corpos e estruturas causadoras das principais anomalias, além de funcionar como um método de separação regional-residual. O detalhamento das estruturas é maior quando se aplicam derivadas de ordens superiores, porém são realçados também os ruídos.

2.5.6 Amplitude do sinal analítico (ASA) - Nabighian (1972); Roest *et al.* (1992)

A amplitude do sinal analítico (ASA) é uma função relacionada às derivadas nas direções x, y e z do campo magnético ou gravimétrico. Embora não seja um parâmetro medido, a ASA é extensivamente aplicada na interpretação magnética e gravimétrica, pois foi até recentemente considerada como completamente independente da direção de magnetização e da direção do campo da Terra (e.g. GUNN, 1997a). De acordo com Gunn (1997b), os picos da ASA são simétricos e ocorrem diretamente sobre as bordas de corpos largos e diretamente sobre o centro

de corpos estreitos. Ainda, as meias-larguras destes picos podem ser relacionadas com a profundidade de contatos magnéticos e gravimétricos verticais. Entretanto, Li (2006) mostrou que a ASA não é completamente independente da magnetização.

A amplitude do sinal analítico corresponde a uma ampla gama de métodos automáticos ou semi-automáticos, baseado no uso de gradientes (derivadas) verticais e horizontais de anomalias de campos potenciais.

Para estruturas 2D, o método assume que a fonte apresenta magnetização uniforme e pode ser representada por seções transversais de polígonos, onde estas estruturas podem também significar a superposição de um número finito de contatos magnéticos ou gravimétricos.

A função amplitude do sinal analítico, ou seu valor absoluto pode ser expressa por um vetor adição de duas componentes reais nas direções x e y e uma componente imaginária na direção z (Figura 2-6), conforme a equação:

$$ASA(x,y) = \left[\left(\frac{\partial M}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ Unidade = nT/m; mGal/m.}$$

onde M é a anomalia do campo potencial, $\partial M / \partial z$ é a primeira derivada vertical, $\partial M / \partial x$ e $\partial M / \partial y$ são as primeiras derivadas horizontais nas direções x e y, respectivamente.

A amplitude do sinal analítico é uma função simétrica em formato de sino (*bell shaped*), com seu máximo situado exatamente sobre o topo de cada contato e sua largura relacionada diretamente com a profundidade do corpo. Como isto é verdade para qualquer ordem de derivadas do sinal (NABIGHIAN, 1974), estas propriedades podem ser utilizadas para localizar os contatos magnéticos e gravimétricos e suas profundidades. Tais características invariáveis são vantajosas na interpretação magnética e gravimétrica, especialmente quando a contribuição da magnetização induzida ou remanescente não pode ser distinguida (ROEST *et al.*, 1992; HSU *et al.*, 1996).

Com o processamento da amplitude do sinal analítico, ao invés da amplitude do sinal original, obtém-se uma separação mais eficiente das anomalias causadas por estruturas que estejam muito próximas entre si (DEBEGLIA & CORPEL, 1997). As amplitudes de enésima ordem de derivação podem ser expressas igualmente em termos da derivada vertical ou das horizontais.

Agarwal & Shaw (1996) e Salem *et al.* (2002) já haviam demonstrado que a forma da amplitude do sinal analítico sobre fontes dipolares são dependentes da direção de magnetização. Haney *et al.* (2003), do mesmo modo, mostraram para casos 3D em geral, que a amplitude do sinal analítico não é a mesma em todas as direções, como sugerido por Roest *et al.* (1992). Como resultado, a amplitude do sinal analítico 3D não é independente da inclinação e da declinação da magnetização dos corpos nem da intensidade do campo magnético da Terra, como já referido.

2.5.7 Inclinação do sinal analítico (ISA) – Miller & Singh (1994b)

A inclinação (fase) do sinal analítico de ordem zero é definida pelo ângulo formado entre os vetores imaginário e real do sinal analítico de mesma ordem, representando o quociente da primeira derivada vertical pelo gradiente horizontal total (Figura 2-6) e pode ser expressa por:

$$ISA = \frac{\partial M / \partial z}{\left[\left(\partial M / \partial x \right)^2 + \left(\partial M / \partial y \right)^2 \right]^{1/2}} \text{ Unidade = radiano (rad);}$$

Este filtro pode ser utilizado para detectar fontes de anomalias de campos potenciais e para prover informações sobre suas extensões horizontais. A inclinação pode ser facilmente determinada a partir das duas derivadas horizontais e da derivada vertical. Ele tem a propriedade de ser positivo acima da fonte, cruzar o zero próximo das bordas e ser negativo fora da fonte. A inclinação do sinal analítico

encerra um atributo adicional, único dentre os vários métodos detectores de bordas, de responder igualmente bem para fontes rasas e profundas. Por esta razão é capaz de detectar a presença de fontes sutis profundas, as quais são freqüentemente mascaradas pela profusão das respostas das fontes mais rasas, sobretudo em áreas fortemente magnetizadas.

Thurston & Smith (1997) demonstraram, a partir da teoria proposta por Nabighian (1984), que a fase do sinal analítico permite realizar estimativas sobre o mergulho e o contraste de susceptibilidade magnética das fontes causadoras de anomalias.

A aplicação da fase do sinal analítico é bastante útil, uma vez que sua amplitude pode sofrer alterações no interior de uma mesma estrutura, porém sua fase permanece constante. A comparação entre a amplitude e a fase do sinal analítico torna mais segura a interpretação de continuidade das estruturas. A interpretação isolada da fase do sinal analítico encerra muita ambigüidade, uma vez que o processamento não distingue os sinais derivados das estruturas geológicas dos ruídos, resultando em uma série de artefatos espúrios dispersos no contexto das anomalias reais.

2.5.8 Gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA) – Verduzco *et al.* (2004)

A aplicação do gradiente horizontal total aos dados da inclinação (fase) do sinal analítico realça feições não claramente identificadas pelos métodos anteriores. Uma das vantagens do método, segundo os autores, é que o gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico é independente da direção de magnetização, e que os resultados denotam uma melhor resolução da função no centro e sobre os limites dos corpos. Outra vantagem desse processo é ser independente da amplitude das anomalias.

De acordo com Verduzco *et al.* (2004) a combinação da inclinação do sinal analítico e suas derivadas horizontais, é altamente recomendada para mapear

estruturas rasas do embasamento e alvos de exploração mineral. Sua expressão é indicada na Figura 2-6) e a seguir.

$$\text{GHT_ISA} = \left[\left(\frac{\partial \text{ISA}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \text{ISA}}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \text{ Unidade = radiano (rad)/m;}$$

2.5.9 *Theta map* – Winjs *et al.* (2005)

Este método é uma ferramenta simples e efetiva para delinear contatos magnéticos e gravimétricos, posicionando as anomalias diretamente sobre suas fontes. É uma técnica resultante do quociente entre o gradiente horizontal total e a amplitude do sinal analítico (Figura 2-6), a qual intensifica os contatos magnéticos e gravimétricos de corpos 2D. Tal método é igualmente válido para dados que tenham sido reduzidos ao polo ou ao equador, mais foi desenvolvido para baixas latitudes magnéticas, regiões nas quais o filtro de redução ao polo envolve instabilidade. O *Theta map* é decorrente da normalização do gradiente horizontal total pela amplitude do sinal analítico, a qual introduz um controle efetivo de ganho, que apesar de perder informação das amplitudes originais das anomalias, realça as baixas amplitudes e facilita a interpretação.

$$\theta = \arccos (\text{GHT}/\text{ASA}). \text{ Unidade = radianos.}$$

2.5.10 Inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT) - Ferreira *et al.* (2010)

A aplicação da inclinação (fase) do sinal analítico aos dados derivados do gradiente horizontal total é recomendada para mapear estruturas e alvos de exploração mineral, realçando feições não claramente identificadas pelos métodos anteriores. Uma das vantagens do método, segundo Ferreira *et al.* (2010), é que ISA_GHT (Figura 2-6) denota melhor resolução dos limites dos corpos, uma vez que

a ISA equaliza as amplitudes do GHT. Portanto, tal método realça simultaneamente bem as respostas de corpos posicionados em profundidades distintas.

$$ISA_GHT = \frac{\frac{\partial GHT}{\partial z}}{\left[\left(\frac{\partial GHT}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial GHT}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad \text{Unidade = radianos (rad)}.$$

2.5.11 Inclinação do gradiente horizontal total (IGHT) - Cooper & Cowan (2006)

A IGHT pode ser considerada uma versão normalizada do GHT pelo gradiente vertical (Gz). Ela também denota igual desempenho para fontes rasas e profundas, como o *Theta map*, os quais são complementares (Figura 2-6). Este filtro é utilizado para delimitar as bordas dos corpos magnéticos. O IGHT é definido pela equação abaixo:

$$\theta = \text{tg}^{-1} = \frac{GHT}{|Gz|} \quad \text{Unidade = radianos (rad)}.$$

2.6 PROCESSAMENTO SEMI-QUANTITATIVO

2.6.1 Espectro de potência radial

A partir de uma malha é gerado o espectro de potência radial, que expressa a energia relativa ao número de onda e a sua direção, através de uma função bidimensional. O resultado do cálculo do espectro radial, realizado pela técnica da Geosoft™ (2001), mostra um gráfico com o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y.

A profundidade estimada para um determinado número de onda pode ser calculada através da relação abaixo:

$$\text{Log } E(r) = 4\pi r,$$

onde:

$E(r)$ = energia;

h = profundidade estatística do topo das fontes;

$r = (u^2 + v^2)^{1/2}$, sendo u e v os números de onda nas direções x e y , respectivamente.

A profundidade para um conjunto estatístico de fontes pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$h = -s/4\pi,$$

onde: h é a profundidade e s é a declividade do logaritmo do espectro de potência.

Para transformar o valor observado no espectro, para um determinado número de onda, em unidades do terreno, deve ser utilizada a relação abaixo:

$$\text{Unidades no terreno} = (1/w) * 1000,$$

onde w é o número de onda.

Estas estimativas podem ser usadas como um guia aproximado na determinação de profundidade de populações de fontes magnéticas, separando-as através de seu espectro em fontes rasas, profundas e intermediárias.

A análise do espectro radial é um recurso semi-quantitativo para determinar a profundidade das fontes magnéticas interpretada pelo domínio da frequência. Essa metodologia não é recomendada para estimar a profundidade de forma quantitativa, pois a profundidade é determinada pela média estimada em relação a um comprimento de onda (GUNN, 1997b).

2.6.2 Deconvolução de Euler

O termo deconvolução, que representa os processos utilizados para eliminar ou atenuar efeitos de natureza convulacional, apesar de estar presente no aplicativo computacional utilizado, não é adequado para descrever a forma através da qual o

cálculo é realizado, tratando-se, mais apropriadamente, de uma modelagem das anomalias.

O método aplica uma varredura nos dados residuais, selecionando anomalias, através de janelas móveis, sobre as quais estima as profundidades das fontes geradoras.

De acordo com o manual do aplicativo, o método *Standard* de Euler é baseado na equação de homogeneidade de Euler, que relaciona os campos gravimétricos e magnéticos e suas derivadas horizontais e vertical com a localização da fonte, através do grau de homogeneidade (η), interpretado como um índice estrutural (THOMPSON, 1982). O índice estrutural é a medida da taxa de mudança da intensidade do campo potencial frente à distância entre a fonte e o detector, para uma determinada geometria do modelo.

O sistema usa o método dos mínimos quadrados para resolver a equação de Euler, em cada ponto da malha, dentro de uma janela pré-estabelecida. Uma janela quadrada dez vezes maior que o tamanho da célula de interpolação, por exemplo, move-se através das colunas do *grid*. Cada ponto da malha envolve 100 equações (10×10), as quais encerram quatro variáveis desconhecidas (localização de x , y , profundidade z e o valor do *background* – B dos campos gravimétricos e magnéticos), além dos erros (desvios padrão). Estas soluções são obtidas para um determinado índice estrutural (η). A solução é considerada válida se a profundidade calculada for menor que a tolerância especificada e se a localização da fonte estiver a uma distância limite do centro da janela, também definida. Ao fim do processo o sistema gera um arquivo (x , y , z) com as soluções.

Para dados de campos potenciais, a equação de Euler pode ser assim formulada:

$$(x - x_0) dT/dx + (y - y_0) dT/dy + (z - z_0) dT/dz = \eta (B - T),$$

Onde x_0 , y_0 , e z_0 marcam a posição da fonte magnética e T é o campo medido no ponto (x , y , z). O valor B representa o regional do campo e η o grau de homogeneidade (índice estrutural). Esta equação é facilmente resolvida para corpos gravimétricos e magnéticos de forma simples (THOMPSON, 1982).

A escolha do índice estrutural é decorrente do conhecimento a priori da geologia local, usualmente utilizando os valores padrão para corpos magnéticos e gravimétricos de formas geométricas simples como indicadas, respectivamente, na Tabela 2-3 e na Tabela 2-4.

A partir de uma malha regular de dados de campos potenciais, pode-se determinar a melhor localização da fonte (x_0 , y_0 , z_0) resolvendo a equação de Euler para um determinado índice estrutural η , pela inversão dos dados, usando o método dos mínimos quadrados. O processo de inversão também envolve erros (desvios padrão) no ajuste de cada parâmetro, os quais podem ser usados como indicativos de aceitação ou rejeição das soluções. Este processo de inversão é denominado deconvolução de Euler.

No método padrão de Euler, a modelagem é realizada sobre uma janela quadrada selecionada do *grid* do campo potencial e de suas derivadas ortogonais, resolvendo o posicionamento das fontes (x_0 , y_0 , z_0) e os erros associados, salvando as soluções, caso as mesmas contemplem certos critérios, e movendo a janela para a próxima posição da malha. A janela de busca é centrada em cada posição da solução. Todos os pontos das janelas são usados para resolver as soluções de Euler, relativas a profundidades e localizações de fontes. A janela deve ser suficientemente grande para incluir cada solução da anomalia de interesse, mas não tão grande que permita incorporar anomalias adjacentes. As soluções de profundidade (desvios padrão) que excedem um limite definido de tolerância (normalmente 15%) e ultrapassem uma distância fixada entre a fonte e a janela, são rejeitadas. Cabe ao intérprete a seleção das soluções restantes, de modo que estas sejam coerentes com a realidade geológica.

Uma vantagem significativa da equação de Euler, quando aplicada a dados magnéticos, é que ela é independente da declinação, inclinação e remanência, desde que estas integrem uma parte da constante na função da anomalia de um dado modelo. Entretanto, problemas existem com feições geológicas posicionadas segundo a direção norte-sul, em baixas latitudes magnéticas, como no Brasil, porque, nestas situações, o sinal detectado é baixo em relação ao ruído.

Tabela 2-3: Corpos magnéticos e respectivos índices estruturais.

Corpo Magnético	Índice Estrutural
Contato/degrau	0
Soleira/dique	1
Cilindro/pipe	2
Esfera	3

Tabela 2-4: Corpos gravimétricos e respectivos índices estruturais.

Corpo Gravimétrico	Índice Estrutural
Soleira/dique/degrau	0
Cilindro/pipe	1
Esfera	2

A qualidade de um mapa de soluções de Euler é definida pelo grau de alinhamento das soluções. Quando estas são alinhadas, no caso de modelos 2D, ou se superpõem, quando em modelos 3D, do tipo esfera/*pipe*/cilindro, com pouca continuidade lateral, os resultados são considerados bons, enquanto soluções dispersas indicam resultados insatisfatórios, conforme mostra a Figura 2-8.

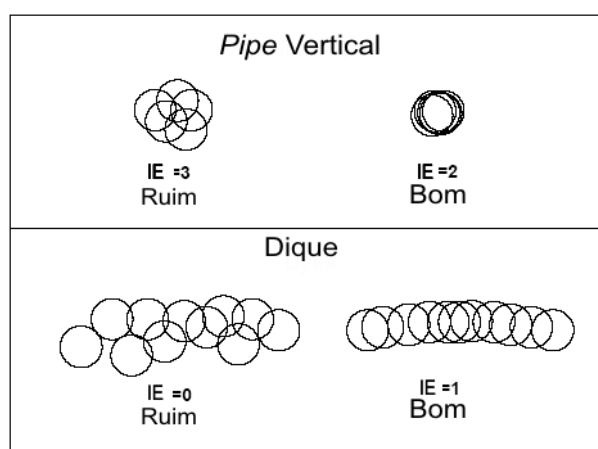


Figura 2-8: Disposição das soluções de Euler para vários modelos, indicando suas respectivas qualidades.

3. MODELOS SINTÉTICOS – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O conhecimento da resposta de anomalias geradas através de campos potenciais, e a partir da aplicação dos métodos de realce descritos no Capítulo 2, é de extrema importância para interpretação geofísica. Durante a pesquisa notou-se a necessidade de se conhecer melhor o desempenho dos produtos gerados a partir destes filtros, e para tal foram gerados modelos sintéticos 2D e 3D, oriundos de experimentos descritos na literatura e também a partir de prismas obtidos através do programa GRAV_MAG_PRISMA, desenvolvido durante a pesquisa. Os resultados são exibidos a seguir.

Inicialmente, foram processados os modelos gravimétricos 2D de Miller & Singh (1994a), e, posteriormente, sobre estes, foram aplicados os métodos de realce da Figura 3-6. Os resultados mais expressivos são apresentados a seguir, conforme a Figura 3-1.

Como se nota na Figura 3-1 (1, 2, 3, 4, 5, 6), as amplitudes das anomalias se atenuam quando a fonte é mais profunda, o que dificulta o delineamento de suas respostas e a conseqüente interpretação. Na Figura 3-1 (2) as bordas do corpo raso são definidas por dois picos de máximo e seu centro por um pico de mínimo, características do gradiente horizontal total (GHT, CORDELL & GRAUCH, 1985), enquanto na primeira derivada vertical da Figura 3-1 (3) o pico de máximo corresponde ao centro do corpo. Na Figura 3-1 (4) o pico de mínimo da segunda derivada horizontal (GX2) está centrado no corpo raso, enquanto os picos de máximo mostram comportamento semelhante na amplitude do sinal analítico (ASA) e na segunda derivada vertical (GZ2), de acordo com a Figura 3-1 (5 e 6).

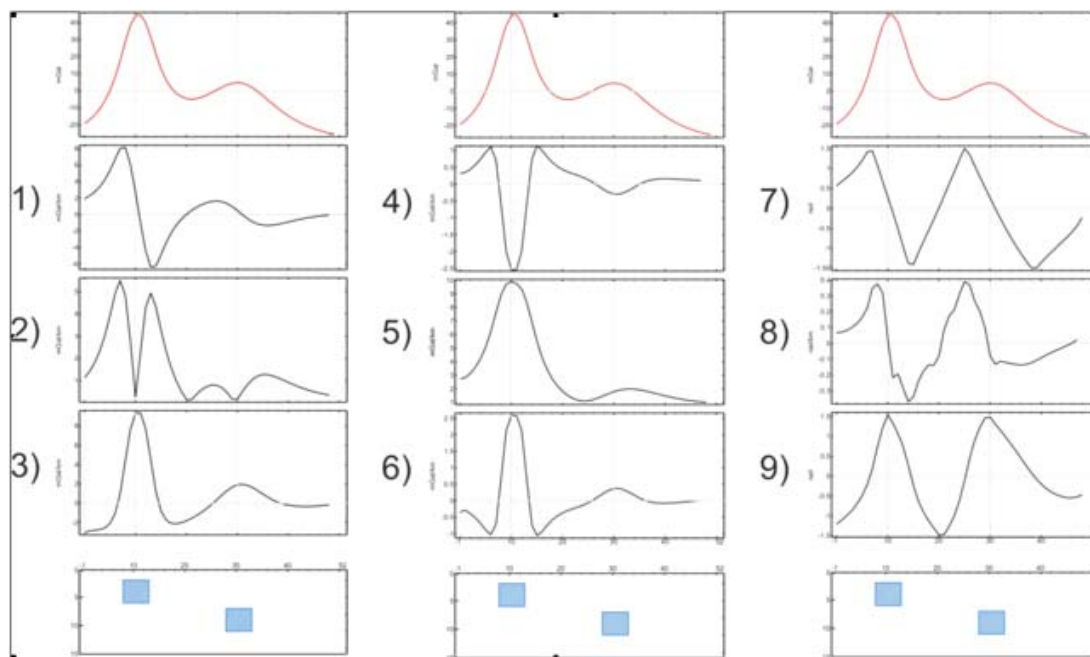


Figura 3-1: Aplicação dos métodos de realce sobre os modelos gravimétricos de Miller & Singh (1994a): linha vermelha – anomalia gravimétrica; polígonos em azul – modelos gravimétricos, 1) primeira derivada horizontal (GX); 2) gradiente horizontal total (GHT); 3) primeira derivada vertical (GZ); 4) segunda derivada horizontal (GX2); 5) amplitude do sinal analítico (ASA); 6) segunda derivada vertical (GZ2); 7) inclinação do gradiente horizontal total (IGHT); 8) gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA); 9) inclinação do sinal analítico (ISA).

Possivelmente para contornar as dificuldades de detecção dos sinais de fontes profundas, Miller & Singh (1994b) propuseram a técnica conhecida como inclinação do sinal analítico (ISA), cujo atributo, único dentre os demais métodos de realce de anomalias gravimétricas e magnéticas, é equalizar as máximas amplitudes e posicioná-las justamente no centro dos corpos, independentemente da profundidade da fonte, como se observa na Figura 3-1 (9). Entretanto, para alguns autores (e.g. COOPER & COWAN, 2006), a inclinação do sinal analítico (ISA), apesar de ser eficiente no balanceamento (equalização) das amplitudes máximas das anomalias, não é um método detector de bordas de fontes, o que pode ser encarado como uma limitação. Na perspectiva de contornar tal limitação, outros métodos foram propostos recentemente visando combinar as propriedades de um método detector de bordas (GHT, CORDELL & GRAUCH, 1985), com outro de equalização das amplitudes máximas sobre o centro das fontes como o ISA (MILLER & SINGH, 1994b). São eles: gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA, VERDUZCO *et al.*, 2004), *Theta map* (WIJNS *et al.*, 2005),

inclinação do gradiente horizontal total (IGHT, COOPER & COWAN, 2006) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT, FERREIRA *et al.*, 2010). Entretanto, a aplicação dos métodos IGHT e GHT_ISA aos modelos gravimétricos de Miller & Singh (1994a), como se nota na Figura 3-1 (7 e 8), não apresentaram resultados satisfatórios, apesar da equalização das amplitudes e da localização dos máximos nas proximidades do centro dos corpos.

Para avaliar as respostas dos modelos 2D de Verduzco *et al.* (2004), em dois ambientes geomagnéticos, os dados foram processados em latitudes ao Norte (valores positivos da inclinação magnética) e ao Sul (valores negativos da inclinação magnética) do Equador Magnético.

As cidades selecionadas para os experimentos foram Curitiba no Brasil e Santiago no Panamá, cujas inclinações são praticamente simétricas. A Tabela 3-1 mostra as características do campo geomagnético em ambas às cidades, no dia 31 de julho de 2009.

Tabela 3-1: Parâmetros do campo geomagnético das cidades de Curitiba (Brasil) e Santiago (Panamá).

País	Cidade	Latitude	Longitude	Declinação	Inclinação	Campo Total (nT)
Panamá	Santiago	08°06'00"	80°57'36"	02°04'	34°59'	33986
Brasil	Curitiba	25°25'48"	49°16'48"	18°25'	-34°52'	22811

Os três modelos geométricos apresentados por Verduzco *et al.* (2004), dique, bloco e degrau (*step*), foram processados para ambas as inclinações magnéticas e os resultados são apresentados, respectivamente, na Figura 3-2, Figura 3-3 e Figura 3-4. Para cada um deles foram calculados os gradientes (horizontal e vertical), a amplitude (ASA) e a inclinação (ISA) do sinal analítico.

Para o modelo dique (Figura 3-2), nota-se que as maiores amplitudes do sinal analítico (ASA) definem muito bem o centro dos corpos. Um aspecto importante é a reprodução do sinal em ambas as inclinações, significando que o método é insensível a variações de inclinação magnética, para modelos 2D, ou seja, um

mesmo corpo com idêntico contraste de susceptibilidade com as encaixantes apresenta a mesma amplitude do sinal analítico (ASA) em qualquer latitude magnética da Terra (e.g. GUNN, 1997b). Entretanto, recentemente, Li (2006) mostrou que a ASA só é completamente independente da magnetização quando se assume que o campo magnético é medido ao longo do eixo x e a uma altura constante z de uma fonte 2D alinhada paralelamente ao eixo y . Li (2006), além de elencar alguns exemplos da literatura (MACLEOD *et al.*, 1993; QIN, 1994; BLAKLEY, 1995; MILLIGAN & GUNN, 1997; TELFORD, 1976), indicou os procedimentos corretos de interpretação da ASA e mostrou sua aplicação a partir de fontes 3D no delineamento das bordas de corpos magnéticos. Ainda na mesma figura observa-se que o GHT e ISA variam de acordo com a inclinação magnética, além de não posicionar, precisamente, o centro e as bordas dos corpos.

No modelo bloco (Figura 3-3), a melhor resposta, mais uma vez, é a da amplitude do sinal analítico (ASA), semelhante em ambas as inclinações, a qual define com clareza, através dos máximos e dos mínimos, as bordas e o centro do corpo, respectivamente. Como se observa na Figura 3-2, os demais métodos não respondem satisfatoriamente. Entretanto, os picos da inclinação do sinal analítico (ISA) se aproximam das bordas do corpo, enquanto os gradientes parecem delinear os seus centros.

A Figura 3-4 mostra que as respostas do modelo degrau (*step*) são mais complexas. As máximas amplitudes do sinal analítico (ASA), apesar de delinearem o *step*, exibem intensidades distintas, o que denota a influência da latitude magnética, também verificada na inclinação do sinal analítico (ISA).

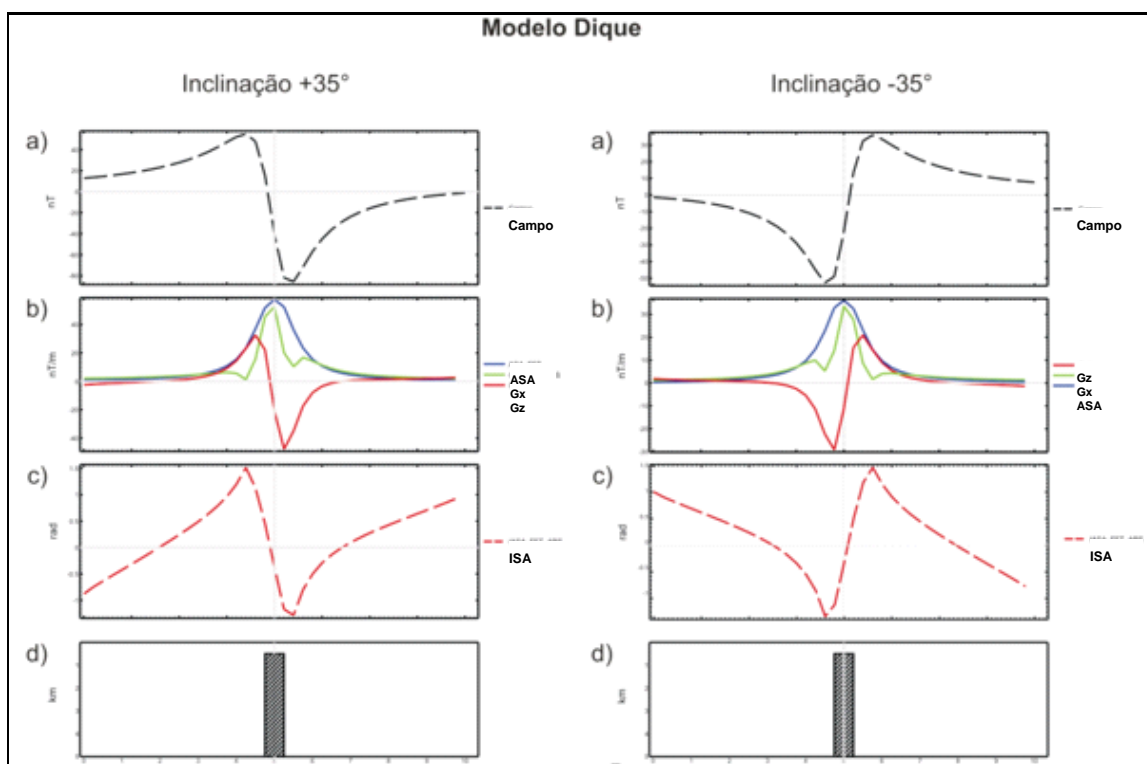


Figura 3-2: Respostas do modelo dique de Verduzco *et al.* (2004). a) anomalia magnética (preto tracejado); b) amplitude do sinal analítico (azul); gradiente horizontal (verde), gradiente vertical (vermelho); c) inclinação do sinal analítico (vermelho tracejado); d) modelo.

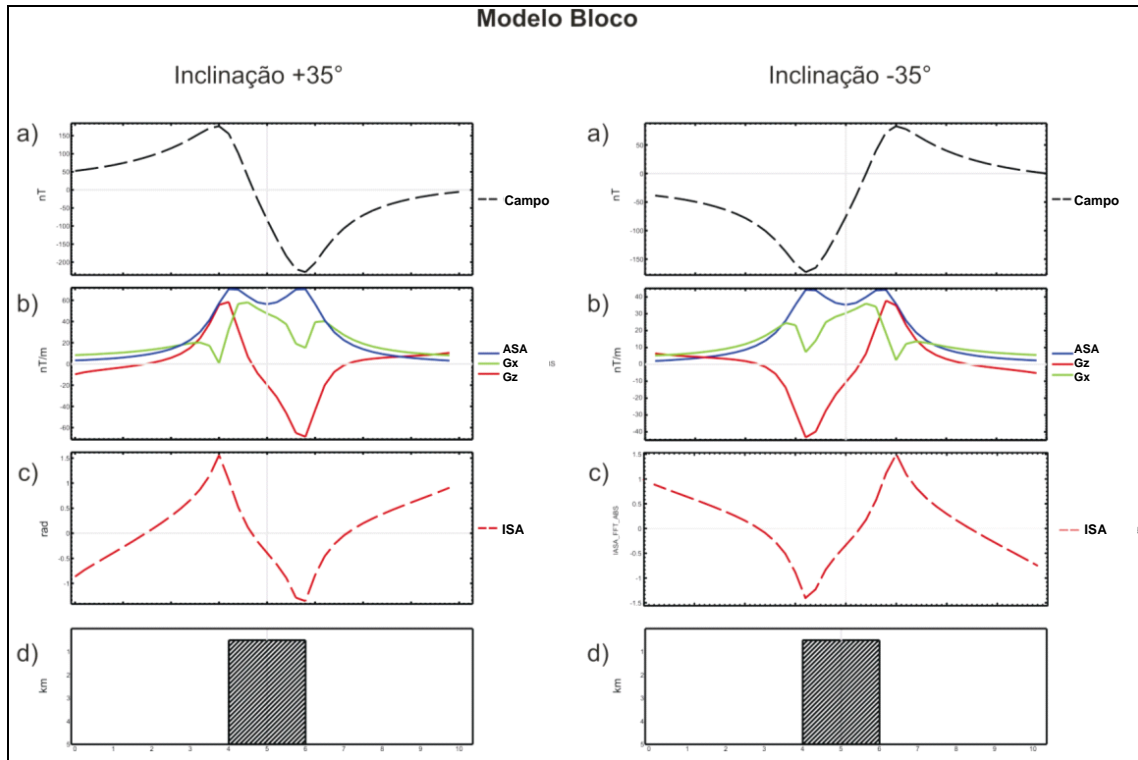


Figura 3-3: Respostas do modelo bloco de Verduzco *et al.* (2004). a) anomalia magnética (preto tracejado); b) amplitude do sinal analítico (azul); gradiente horizontal (verde), gradiente vertical (vermelho); c) inclinação do sinal analítico (vermelho tracejado); d) modelo.

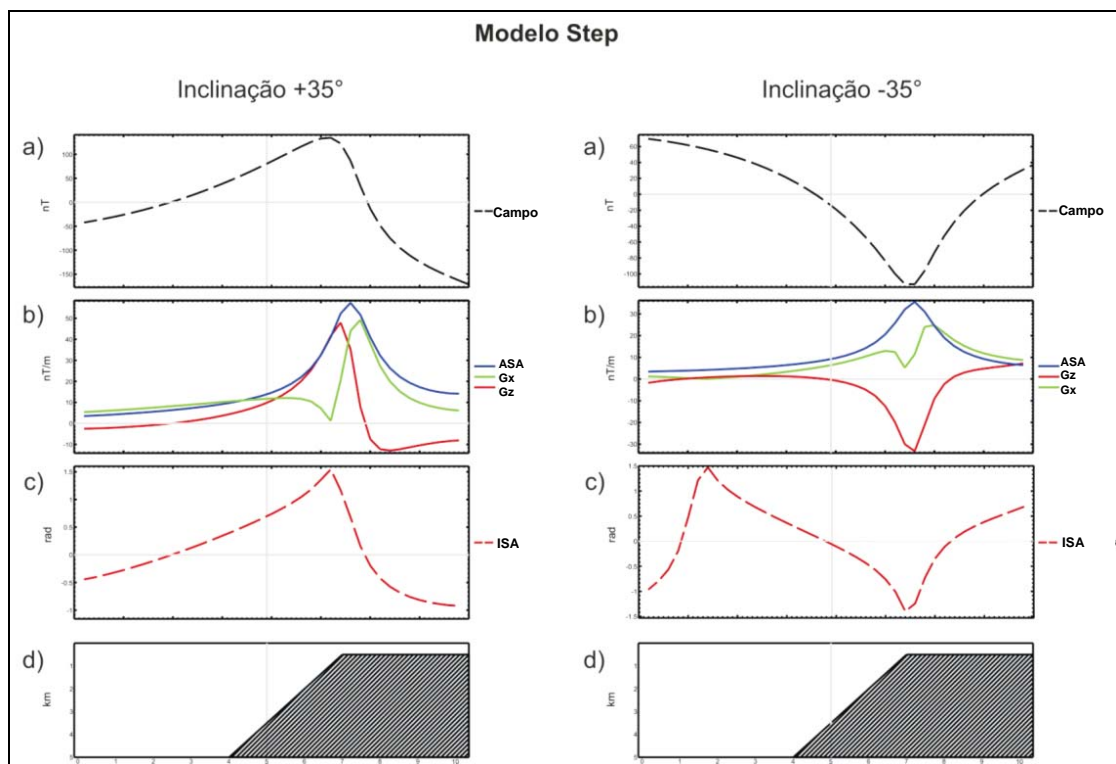


Figura 3-4: Respostas do modelo degrau (*step*) de Verduzco *et al.* (2004). a) anomalia magnética (preto tracejado); b) amplitude do sinal analítico (azul); gradiente horizontal (verde), gradiente vertical (vermelho); c) inclinação do sinal analítico (vermelho tracejado); d) modelo.

A interpretação magnética é mais complexa do que a gravimétrica, principalmente pela natureza dipolar do campo magnético, em contraste ao campo gravimétrico monopolar, além da dependência da direção de aquisição dos dados e da magnetização (induzida e remanente). Por este motivo, o estudo do comportamento do sinal magnético de modelos sintéticos 3D têm se tornado de extrema importância para auxiliar a interpretação de dados aeromagnéticos disponíveis em grandes áreas, em termos de cartografia de estruturas e contatos geológicos, estimativas de forma e profundidade das fontes e elaboração de modelos geofísicos quantitativos.

Neste capítulo também são apresentados testes da resposta do sinal magnético de modelos sintéticos 3D em regiões localizadas próximas ao Equador Magnético (latitudes magnéticas entre $+20^\circ$ e -20° , e.g. LI, 2008) e no polo, para avaliar o desempenho do método de redução ao polo (RTP) nestas regiões, além de discutir os resultados da aplicação de vários métodos de realce de anomalias magnéticas, discutidos no capítulo anterior, incluindo a técnica ISA_GHT,

recentemente desenvolvida por Ferreira *et al.* (2010), durante esta pesquisa. Para tanto foram cotejadas as respostas magnéticas dos métodos de realce, geradas a partir de modelos sintéticos, com base no programa GRAV_MAG_PRISMA (BONGIOLO, *et al.* 2011a), desenvolvido no Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFPR).

Conforme já mencionado, as anomalias magnéticas dependem da direção da magnetização (induzida e remanente) e da direção de aquisição dos dados. Considerando apenas a magnetização induzida, a técnica de redução ao polo (RTP) permite que as anomalias se posicionem diretamente sobre as fontes, minimizando os efeitos da inclinação magnética. Este método é aplicado em modelos sintéticos, inseridos em áreas de baixas latitudes magnéticas, onde a técnica de RTP é reconhecidamente instável, uma vez que tanto a parte real quanto a imaginária, ambas no denominador da equação do filtro RTP, se aproxima de zero (e.g. LI, 2008). Para a aplicação do filtro RTP foi utilizado o módulo Magmap do programa Oasis Montaj (GEOSOFT™, 2001), onde são requeridos os seguintes parâmetros: inclinação e declinação magnéticas, além de um fator de correção para regiões de baixas latitudes, o qual é relacionado ao complemento da inclinação magnética da área de estudo: por exemplo, caso o valor da inclinação magnética seja $+12^\circ$, o fator de correção a ser usado será de $+78^\circ$.

A pesquisa de modelos sintéticos foi realizada para avaliar o comportamento do sinal magnético e suas limitações, de acordo com a localização da área de estudo, cujo ponto central está situado nas coordenadas geográficas $-4^\circ 00'S$ e $-56^\circ 00'W$ (inclinação = $+12^\circ 34'$, declinação = $-13^\circ 18'$), portanto muito próximo do Equador Magnético, onde o campo total é quase que essencialmente representado pela sua componente horizontal.

Anomalias sintéticas oriundas de corpos magnetizados de geometria conhecida são de grande importância na avaliação de métodos de realce. De particular interesse são aquelas decorrentes de modelos prismáticos, em função de

suas aproximações às principais estruturas geológicas (BHATTACHARYYA, 1964; TALWANI, 1965; PLOUFF, 1976; SINGH & GUPTASARMA, 2001).

No intuito de comparar as respostas do sinal magnético dos modelos sintéticos inseridos na área de estudo, reduzidos ao polo (RTP) e no polo, foram aplicados vários métodos de realce de anomalias recentemente divulgados com o objetivo de delinear os limites das fontes para facilitar a interpretação magnética-estrutural. As técnicas de realce utilizadas foram às seguintes: amplitude do sinal analítico (ASA – NABIGHIAN, 1972, 1974; ROEST *et al.*, 1992), gradiente horizontal total (GHT – CORDELL & GRAUCH, 1985), inclinação do sinal analítico (ISA – MILLER & SINGH, 1994b), gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA – VERDUZCO *et al.*, 2004) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT – FERREIRA *et al.*, 2010).

Para avaliar a resposta do sinal magnético de modelos sintéticos 3D, em diferentes localizações da superfície terrestre foi aplicado o programa GRAV_MAG_PRISMA, em linguagem MATLAB®/OCTAVE, com base na proposta de Bhaskara Rao & Ramesh Babu (1991), cujos parâmetros de entrada são: inclinação, declinação e intensidade do campo geomagnético (IGRF), coordenadas centrais x, y e profundidades ao topo (z) dos prismas, susceptibilidade magnética (κ) e inclinação dos corpos em relação ao Norte.

O programa GRAV_MAG_PRISMA foi utilizado no intuito de discutir as respostas magnéticas de prismas localizados em diferentes latitudes magnéticas (área de estudo e no polo), com as mesmas dimensões, variando apenas a profundidade ao topo das fontes. Posteriormente, foram aplicados os métodos de realce no sentido de contribuir na avaliação da atenuação e do deslocamento dos sinais em referência a localização das fontes causativas.

Os testes foram realizados com base nos modelos 3D da Figura 3-5, cujos parâmetros geométricos e magnéticos são indicados na Tabela 3-2 e na Tabela 3-3, respectivamente.

De acordo com os dados da Tabela 3-2, os prismas exibem as mesmas dimensões, porém profundidades ao topo distintas ($P1=100\text{m}$, $P2=200\text{m}$, $P3=300\text{m}$).

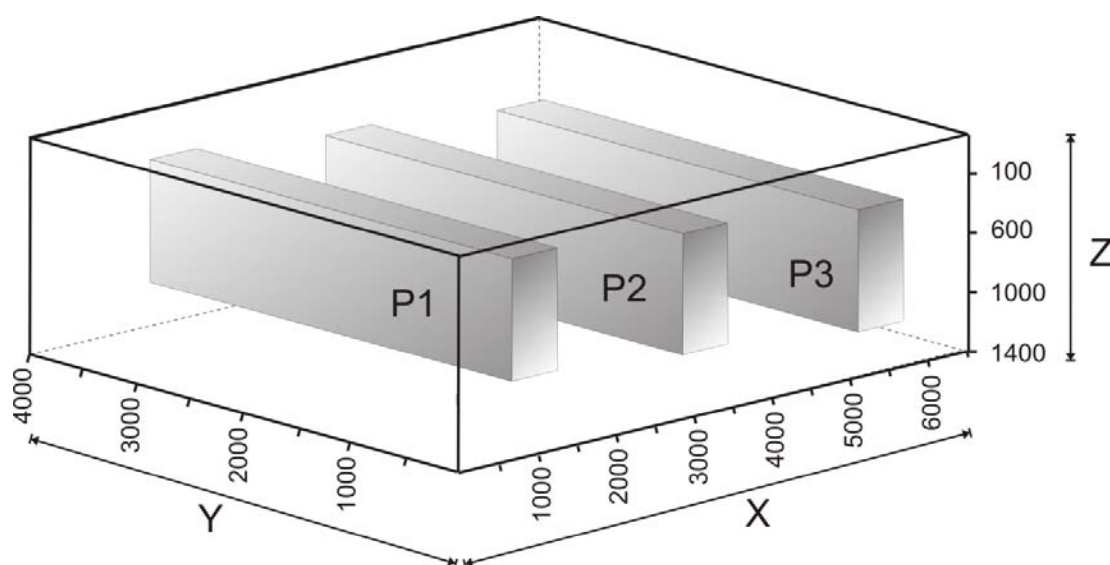


Figura 3-5: Representação dos modelos sintéticos 3D.

Tabela 3-2: Parâmetros geométricos dos modelos (Figura 3-5).

Localização	Prisma P1	Prisma P2	Prisma P3
X (m)	500-1000	3000-3500	5500-6000
X centro	750	3250	5550
Y (m)	500-3500	500-3500	500-3500
Y centro	2000	2000	2000
Z (m)	100-1100	200-1200	300-1300
	100	200	300

Conforme a Tabela 3-3, a magnetização induzida foi considerada $\kappa = 0,0276$ SI (valor médio baseado em outros experimentos) e os modelos foram inseridos nos ambientes geomagnéticos da área de estudo e no polo.

Tabela 3-3: Parâmetros magnéticos dos modelos (Figura 3-5).

Parâmetros	Área	Polo
Latitude	-04°00'00"S	85°00'00"
Longitude	-56°00'00"W	132°36'00"
Declinação (D°)	-13°18'	0,0
Inclinação (I°)	+12°34'	90,0
Intensidade (T)	27.865×10^{-9}	56.973×10^{-9}
Ji (A/m)	0,61	1,25

Os dados gerados pelo programa GRAV_MAG_PRISMA são fornecidos no formato ASCII, os quais foram importados para a plataforma Oasis Montaj (GEOSOFT™). A partir daí os dados foram interpolados através do método da curvatura mínima (BRIGGS, 1974), para a geração de uma malha regular, com espaçamento de 20 x 20 metros, resultando no mapa magnético da Figura 3-6, na qual as intensidades das anomalias diminuem com o incremento da profundidade dos modelos.

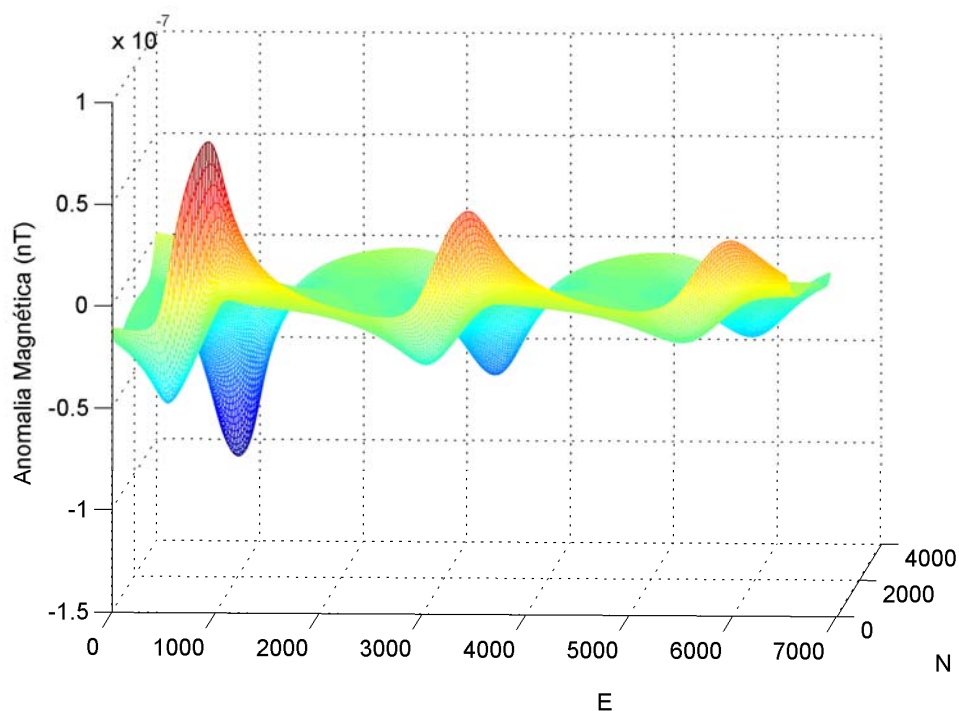


Figura 3-6: Anomalias magnéticas dos prismas (Figura 3-5) geradas a partir do programa GRAV_MAG_PRISMA para o ambiente geomagnético da área de estudo.

A Figura 3-7 e a Figura 3-8 exibem mapas derivados dos métodos de realce gerados a partir dos parâmetros geométricos (Tabela 3-2) e magnéticos (Tabela 3-3) dos prismas na área de estudo (painel esquerdo), dos dados reduzidos ao polo (painel central) e dos dados no polo (painel direito).

A análise visual dos mapas permitiu tecer algumas considerações para cada método. As anomalias do campo magnético da área de estudo (A1, Figura 3-7), reduzidas ao polo (A2, Figura 3-7) e no polo (A3, Figura 3-7) mostram atenuações nas amplitudes, em correspondência ao aumento das profundidades dos prismas.

O mapa de anomalias da área de estudo (A1, Figura 3-7) mostra que as bordas dos modelos são delineadas por mínimos e máximos, refletindo o caráter dipolar do campo magnético. Ao aplicar o filtro RTP aos dados anteriores se verifica que os máximos se localizam aproximadamente sobre as fontes (A2, Figura 3-7), de forma semelhante às anomalias situadas no polo (A3, Figura 3-7).

De acordo com a teoria da amplitude do sinal analítico (ASA, NABIGHIAN, 1972, 1974 e ROEST *et al.*, 1992), os mapas B1, B2 e B3 (Figura 3-7) definem bem as bordas e os eixos de corpos espessos através de máximos e mínimos relativos, respectivamente. Entretanto, do mesmo modo, os sinais são atenuados com a profundidade das fontes. Por outro lado, a característica mais importante, neste caso, é a aparente independência da inclinação, visto que os mapas B1 e B2 (Figura 3-7) apresentam resultados semelhantes, mesmo que a amplitude do sinal analítico (ASA) tenha sido considerada, recentemente, dependente da latitude magnética para modelos 3D (LI, 2006).

O comportamento dos sinais no mapa do gradiente horizontal total (GHT, C1, Figura 3-7), mostra que este método depende da inclinação magnética, enquanto os mapas C2 e C3 (Figura 3-7) revelam que as bordas dos corpos são delineadas por máximos, enquanto os centros são indicados por mínimos (CORDELL & GRAUCH, 1985), os quais também se atenuam em função da profundidade dos modelos.

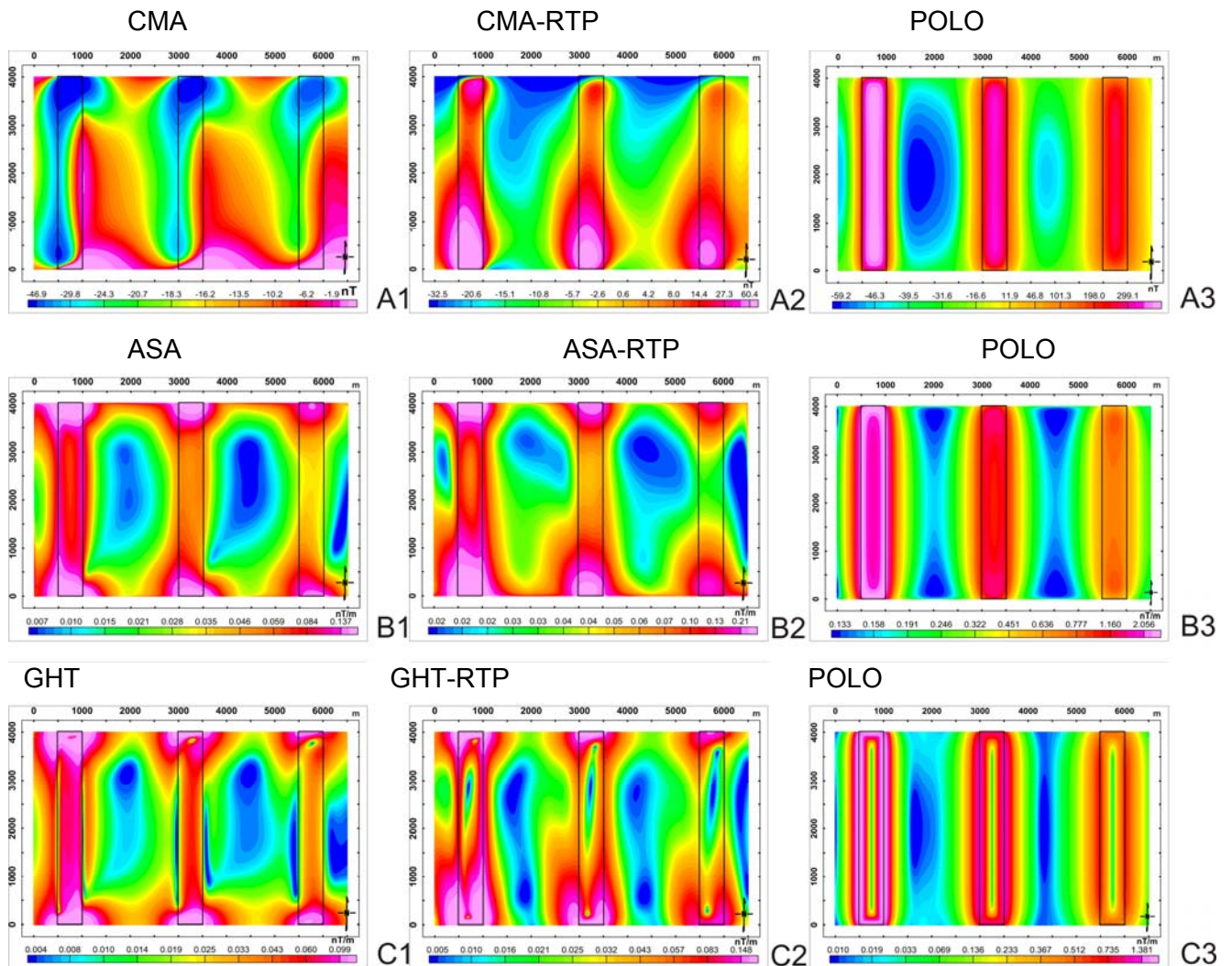


Figura 3-7: Mapas do campo magnético anômalo **CMA** (A1), CMA-RTP (A2) e no polo (A3); da amplitude do sinal analítico (**ASA**- B1, ASA-RTP-B2 e ASA no polo-B3) e do gradiente horizontal total (**GHT**-C1, GHT-RTP-C2 e GHT no polo-C3).

O procedimento da inclinação do sinal analítico (ISA), introduzido por Miller & Singh (1994b) e testado em dados gravimétricos, no início deste capítulo, tem como principal característica equalizar as máximas amplitudes, do que decorre sua independência da profundidade das fontes, e posicioná-las diretamente sobre seus centros. Este último atributo, entretanto, mostra que ISA não é um método detector de bordas, como assinalaram Cooper & Cowan (2008). A inclinação do sinal analítico (ISA) normaliza a primeira derivada vertical pelo GHT. Em função das características trigonométricas do arco-tangente, ISA varia de $-\pi/2$ a $+\pi/2$. O mapa D1 (Figura 3-8) mostra que ISA depende da inclinação magnética (e.g.

VERDUZCO *et al.*, 2004), enquanto os mapas D2 e D3 (Figura 3-8) refletem os mencionados atributos de ISA, localizando as anomalias e homogeneizando as profundidades das fontes.

A técnica do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA), proposta por Verduzco *et al.* (2004), é independente da inclinação e da intensidade da anomalia, além de realçar e centralizar as máximas amplitudes sobre os limites das fontes. Tais atributos são da maior relevância para a interpretação qualitativa de dados de campos potenciais. Entretanto, ao observar os mapas E1, E2 e E3 (Figura 3-8), nota-se também que as amplitudes das anomalias são atenuadas com a profundidade dos modelos, além da profusão de ruídos (E1 e E2) (e.g. FERREIRA *et al.*, 2010), dificultando a interpretação estrutural. Esta resposta pode ser devido a profundidade dos corpos, visto que o autor define a boa resposta do método para corpos rasos e mineralizados.

O método ISA_GHT (FERREIRA *et al.*, 2010), enquanto dependente da latitude magnética (F1, Figura 3-8), mostrou resultados satisfatórios só quando aplicado aos dados reduzidos ao polo (F2, Figura 3-8), uma vez que as bordas dos prismas são igualmente realçadas por máximas amplitudes do sinal, como decorrência da equalização pelo ISA, portanto sem guardar relação com a profundidade dos modelos (FERREIRA *et al.*, 2010), de modo semelhante ao mapa F3 (Figura 3-8). Tais resultados se apresentam como feições lineares e contínuas sobre as fontes, melhor refletindo as estruturas geológicas, facilitando a interpretação qualitativa.

As análises semi-quantitativas basearam-se na deconvolução de Euler. As soluções de Euler foram aplicadas para o modelo estrutural dique (SI=1) com tolerância 1 e janela 3, sobre as anomalias residuais e sobre o filtro da amplitude do sinal analítico.

Nota-se pela resposta do mapa do campo magnético anômalo (Figura 3-9), que as soluções se posicionam sobre os prismas e mantém a profundidade esperada de acordo com os dados inseridos nos modelos. Fica também evidente a

influência da inclinação magnética, que causa distorção nas bordas superiores e inferiores dos prismas, sendo intensificada com aumento da profundidade, bem como a sobreposição de profundidades (p. Ex. 200 e 300 m) pelo fato de cada prisma ter 100 metros de espessura.

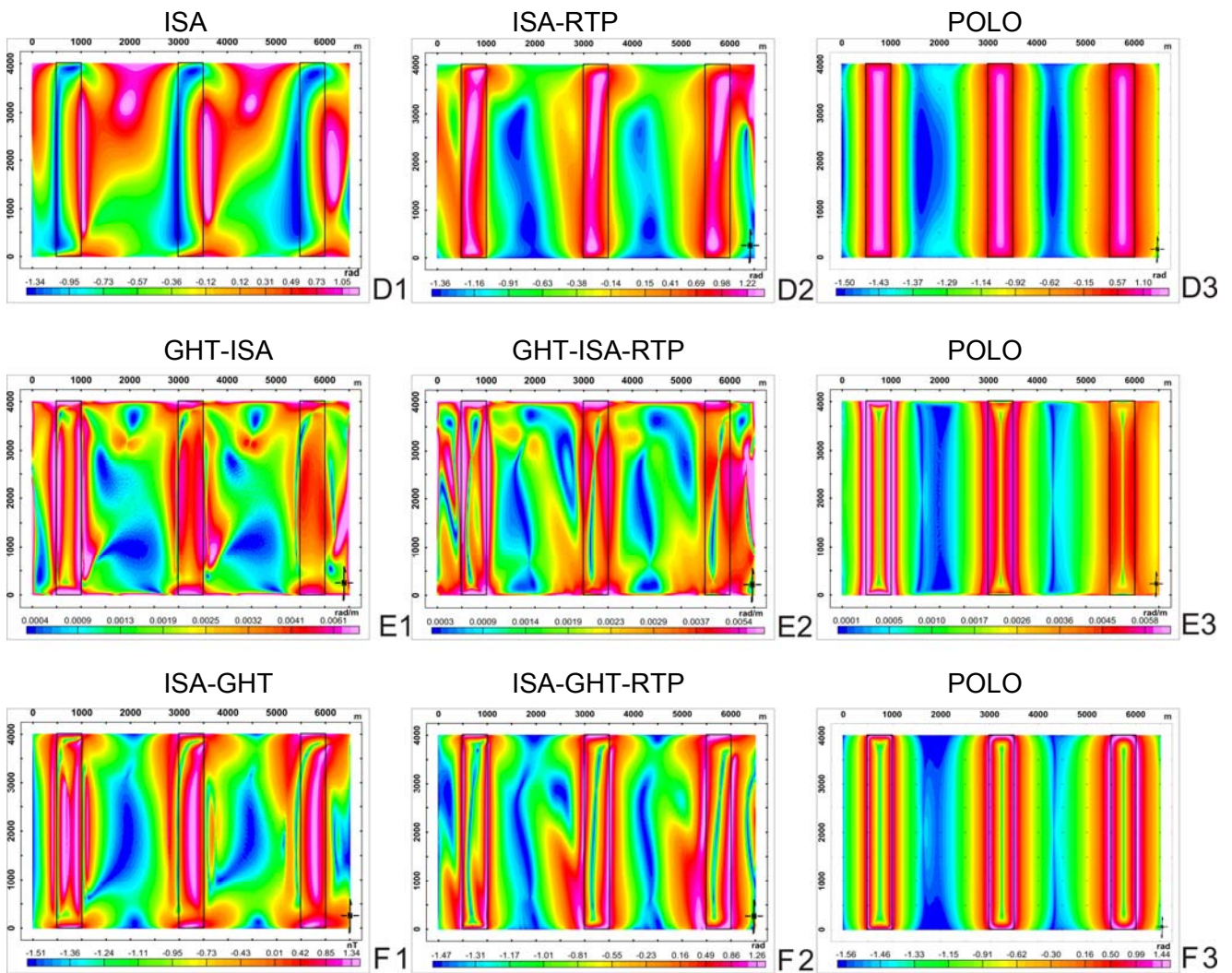


Figura 3-8: Mapas da inclinação do sinal analítico (ISA-D1, ISA-RTP-D2 e ISA no polo D3); do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA- E1, GHT_ISA-RTP-E2 e GHT_ISA no polo-E3) e da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT-F1, ISA_GHT-RTP-F2 e ISA_GHT no polo-F3).

A deconvolução de Euler foi aplicada também sobre o filtro da amplitude do sinal analítico no intuito de localizar as anomalias sobre as fontes. O mapa da Figura 3-10 exibe as soluções geradas sobre as fontes, com maior acuracidade na localização sobre os prismas, porém permanecendo, com menor intensidade, a

atenuação e distorção em função do aumento da profundidade. A escala de cores mostra a coerência das soluções com as profundidades esperadas, melhor representada que quando aplicadas as soluções sobre o campo anômalo, como também a sobreposição de fontes devido a espessura dos prismas.

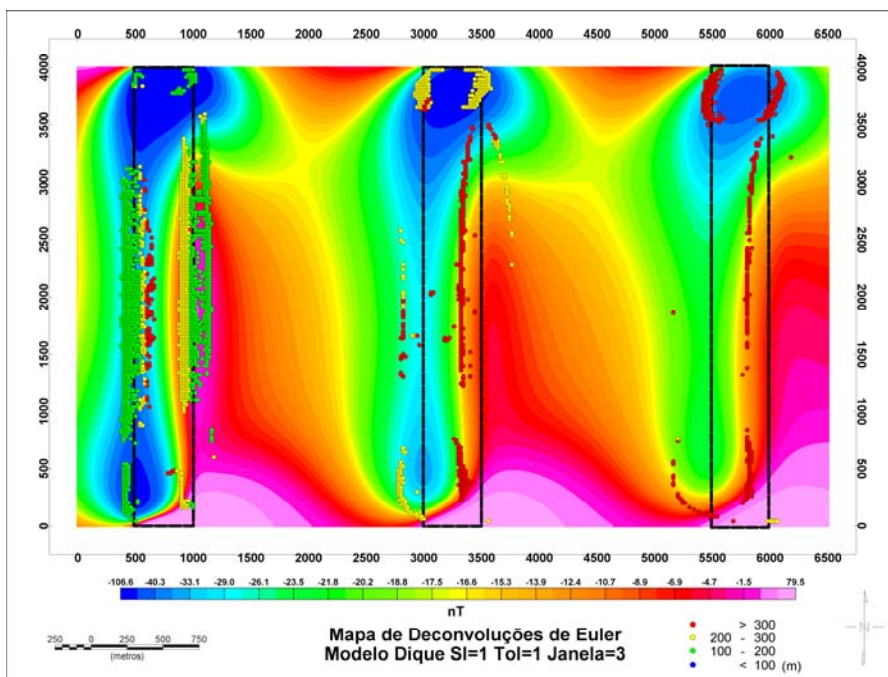


Figura 3-9: Mapa das soluções de Euler para o modelo dique sobre o campo magnético anômalo.

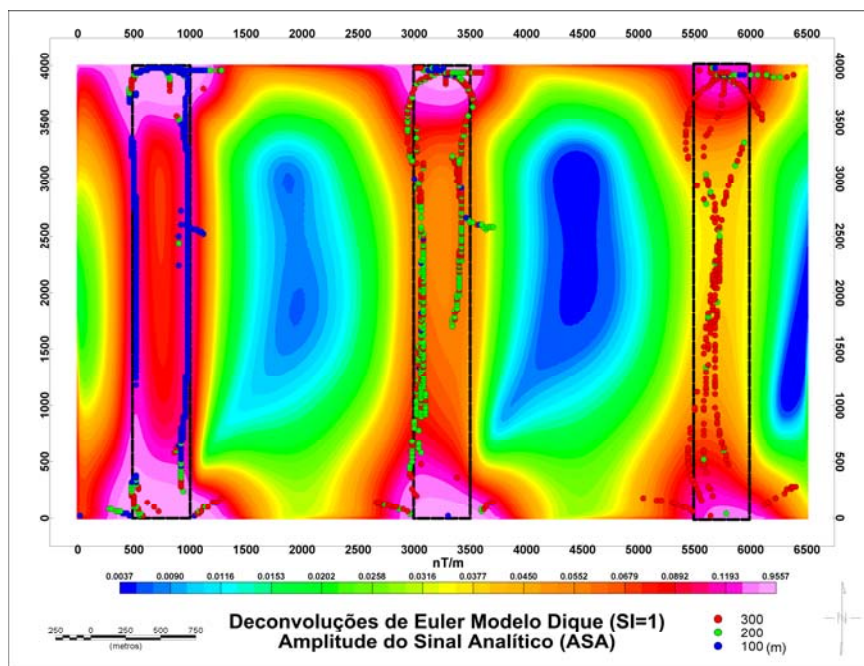


Figura 3-10: Mapa das soluções de Euler para o modelo dique sobre a amplitude do sinal analítico.

4 GEOLOGIA REGIONAL E LITOESTRATIGRAFIA DA BACIA E CRÁTON DO AMAZONAS

A Bacia do Amazonas (Figura 4-1) situa-se entre os escudos pré-cambrianos das Guianas (ao Norte) e Brasileiro (ao Sul). Limita-se a Oeste pelo Arco de Purus, que a separa da Bacia do Solimões e a Leste pelo Arco de Gurupá, que a separa da Bacia do Marajó. Ocupa uma área de 750.000 Km² estando preenchida principalmente por rochas paleozóicas e secundariamente cretáceas-terciárias, as quais apresentam, respectivamente, espessuras preservadas superiores a 4.000m e 1.000m (COSTA, 2002).

As primeiras pesquisas geológicas na Bacia do Amazonas foram realizadas por Thayer em 1865 e 1866 e Morgan nos anos de 1870 e 1871 (MENDES & PETRI, 1971), como também os trabalhos de Derby (1877), Paiva (1929) e Moura (1938).

Na década de 50, as pesquisas passaram por um significativo avanço, quando teve início a análise geofísica. Linsser (1958 citado por MOSMANN *et al.*, 1986), por meio de estudos sísmicos e gravimétricos, observou massas de elevada densidade concentradas no embasamento, que poderiam ser o resultado de processos de afinamento crustal seguidos de rifteamento e soerguimento mantélico. Posteriormente, o controle exercido na sedimentação é explicado por movimentos transcorrentes por Loczy (1970 citado por MOSMANN *et al.*, 1986) e Rezende & Brito (1973).

Bigarella (1973) realizou uma pesquisa que correlacionou as estruturas da Bacia do Amazonas com as demais bacias intracratônicas. Na ocasião propôs uma divisão da bacia em quatro subunidades separadas pelos arcos de Iquitos, Purus e Gurupá (Figura 4-1).

Após estes trabalhos pioneiros sobre a Geologia da Amazônia, a Petrobras através de várias campanhas de mapeamentos geológicos, perfuração de poços, programas de levantamentos geofísicos (sísmica, gravimetria e aeromagnetometria)

e geoquímicos na bacia, definiu alvos exploratórios com potencial petrolífero. Estes investimentos aumentaram o conhecimento sobre a geologia da bacia, visando o entendimento de sua evolução e preenchimento sedimentar. Um dos principais trabalhos foi o Projeto RADAM (SANTOS *et al.*, 1975) com a análise e mapeamento de unidades associando trabalhos de campo com análise de imagens de radar e fotografias aéreas.



Figura 4-1: Localização da Bacia do Amazonas no contexto da América do Sul e seu posicionamento paleogeográfico e das bacias intracratônicas brasileiras no Pangea ao final do Permiano (SOUZA-LIMA, 2005).

Aspectos geológicos também foram discutidos por Amaral (1974) com base em informações obtidas por sensoriamento remoto e por Hasui *et al.* (1984) por meio de estudos gravimétricos.

4.1 GEOLOGIA DO EMBASAMENTO

Sabe-se que a Bacia do Amazonas se instalou sobre as rochas do Cráton Amazônico, o qual está inserido no contexto da Plataforma Sul-Americana definida por Almeida (1967). O embasamento desta plataforma é constituído por crosta continental arqueana e proterozóica formada durante dois eventos orogênicos principais: Transamazônico e Brasileiro (ALMEIDA *et al.*, 2000), que ocorreram em diversos locais dos atuais continentes africano e sul-americano.

O evento Brasileiro permeou todo o Neoproterozóico e Cambriano, quando teve lugar a consolidação dos cinturões de dobramento ao redor dos núcleos cratônicos, formando assim o supercontinente Gondwana (ALMEIDA, 1967). Este seria o último evento colisional do qual fez parte o Cráton do Amazonas, representado pelos cinturões Araguaia, Paraguai e Tucavaca (GERALDES, 2007).

O Cráton do Amazonas foi estudado por diversos autores (ALMEIDA *et al.*, 1977; CORDANI *et al.*, 1984; COSTA & HASUI, 1997; TASSINARI & MACAMBIRA, 1999; SANTOS *et al.*, 2000), visando a interpretação de sua evolução, com base em dados geológicos (estruturais, geocronológicos e litológicos) e geofísicos (gravimetria e magnetometria). Um dos modelos propostos para a instalação da Bacia do Amazonas relaciona a geração de falhas e material vulcânico, no intervalo Neoproterozóico/cambriano, a processos de rifteamento com preenchimento posterior de sedimentos flúvio-lacustrinos (ALMEIDA, 1967; CUNHA *et al.*, 1994; ALMEIDA *et al.*, 2000 e ZALÁN, 2004).

O Cráton do Amazonas localiza-se na faixa Setentrional da América do Sul e compreende uma superfície de cerca de $4,3 \times 10^5 \text{ km}^2$. É dividido em dois escudos principais: Guaporé a Sul e das Guianas a Norte, os quais são separados por rochas sedimentares da Bacia Paleozóica do Amazonas (TASSINARI & MACAMBIRA, 2004).

A evolução geológica do Cráton Amazônico está relacionada a diversas fases de formação e deformação de rochas. Montalvão *et al.* (1975 citados por

COSTA & HASUI, 1997) ao estudarem a região do Cráton das Guianas, identificaram quatro etapas evolutivas. A primeira delas estaria relacionada ao evento Guriense ($> 2,6$ Ga) e teria formado faixas de dobramento. A segunda estaria relacionada ao episódio orogênico Transamazônico (2,6 Ga-2,0 Ga), responsável pelos dobramentos segundo NW-SE e WNW-ESE. Intrusões vulcânicas intermediárias a ácidas, subvulcânicas e anorogênicas, deposição de sedimentos do Grupo Roraima e colocação de corpos básicos toleíticos representam a terceira etapa de evolução. O episódio K'Mudku (1,3 Ga-1,0 Ga) foi um evento importante que produziu cataclase regional e caracteriza a quarta etapa.

Duas linhas de concepção evolutiva são propostas: a primeira, e mais antiga, considera que a tectônica pré-cambriana do cráton é caracterizada por processos de reativação de plataforma e formação de blocos continentais por meio de retrabalhamento crustal no Arqueano e no Paleoproterozóico. No Mesoproterozóico, somente material crustal seria retrabalhado (ALMEIDA, 1978; HASUI *et al.*, 1984). A segunda vertente, consolidada em conceitos mobilistas, propõe que durante o Arqueano, Paleoproterozóico e Mesoproterozóico teriam se desenvolvido sucessivos arcos magmáticos com envolvimento de material juvenil derivado do manto, como também processos subordinados de retrabalhamento crustal (CORDANI, 1979; TEIXEIRA *et al.*, 1989).

Através do emprego de análises isotópicas foi possível a definição de províncias geocronológicas para complementar interpretações acerca da evolução crustal e suas implicações tectônicas em escala mundial. As denominadas províncias geocronológicas são grandes zonas inseridas em áreas cratônicas, predominando determinado padrão geocronológico. De acordo com Tassinari & Macambira (1999) os limites são traçados com base nas idades do embasamento metamórfico, nas características geológicas e nos dados geofísicos. Porém, Santos *et al.* (2000) consideram que os modelos baseados apenas em dados geocronológicos Rb-Sr podem ser limitados. Eventos superpostos podem facilmente zerar o registro geocronológico, em função de polimetamorfismo, polideformação ou

metamorfismo de alto grau. Para os autores, é necessário realizar análises com métodos mais robustos, no caso U-Pb ou Sm-Nd. Assim, Santos (2006) ao realizar uma revisão das unidades propostas anteriormente e com base em novos mapeamentos geológicos regionais (SCHOBENHAUS *et al.*, 2003) e aerogeofísicos e, principalmente apoiado em idades U-Pb e Sm-Nd, contribuiu para um melhor entendimento do Cráton do Amazonas e refinamento dos limites de suas províncias geológicas.

Tassinari & Macambira (1999) subdividem o Cráton do Amazonas em seis províncias geocronológicas com limites traçados com base em análises isotópicas do embasamento metamórfico, dados geofísicos e características geológicas das rochas. De acordo com a Figura 4-2 as províncias, da mais antiga para mais nova, possuem as denominações de Amazônia-Central (2,5 Ga), Maroni-Itacaiúnas (2,25-2,0 Ga), Ventuari-Tapajós (1,95-1,8 Ga), Rio Negro-Juruena (1,8-1,55 Ga), Rondoniana-San Ignacio (1,55-1,3 Ga) e Sunsás (1,3-1,0 Ga).

Para Santos *et al.* (2000), o cráton pode ser subdividido em 7 províncias geocronológicas como mostra a Figura 4-3: Amazônia Central (supostamente arqueana); Carajás (3,0-2,5 Ga), Transamazonas (2,26-2,01 Ga), Tapajós-Parima (2,03-1,88 Ga), Rio Negro (1,82-1,52 Ga), Rondônia-Juruena (1,82-1,54 Ga) e Sunsás e K'Mudku (1,45-1,10 Ga). Estes autores basearam-se principalmente em datações geocronológicas, considerando dados estruturais e geológicos.

Após a formação do embasamento da Plataforma Sul-Americana, no chamado estágio de transição (ALMEIDA, 1967), ocorreu diminuição dos processos de dobramento e aumento dos falhamentos (fase tafrogênica), com a geração de fossas intermontanas, antefossas e bacias marginais, e conseqüente preenchimento por sedimentos de origem detrítica continental e material vulcânico (ALMEIDA & HASUI, 1984). Estes sedimentos deram origem às rochas do Grupo Purus (CUNHA *et al.*, 1994), depositadas em sistemas alúvio-flúvio-lacustres.

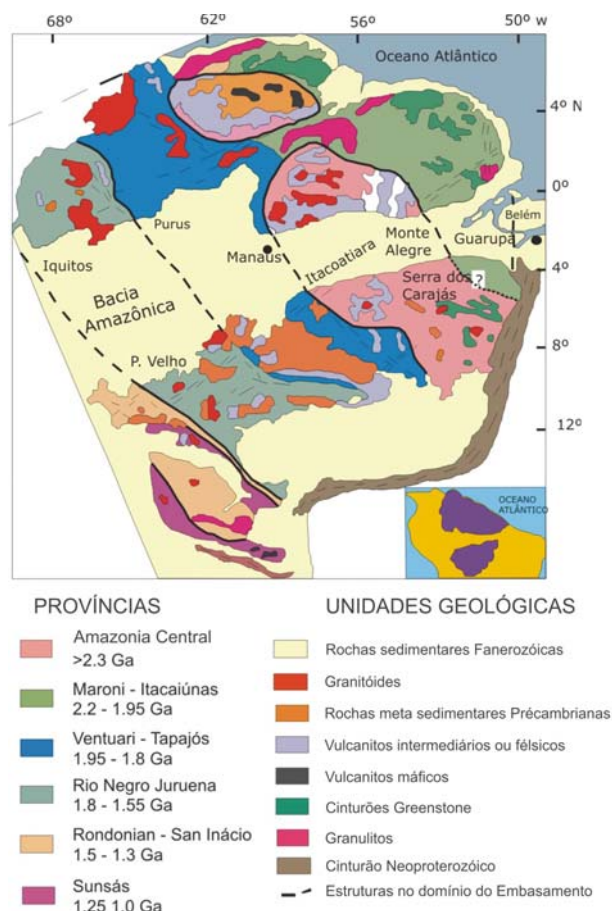


Figura 4-2: Mapa das províncias geocronológicas e suas respectivas idades, modificado de Tassinari & Macambira (1999).

Almeida (1967), Almeida *et al.* (2000) e Zalán (2004) relacionaram as falhas (eventos distensionais) e geração de material vulcânico a processos de rifteamento que poderiam ter originado a Bacia do Amazonas. Outra proposta sugere que a origem da bacia estaria relacionada à Orogênese Brasileira, atuante na Faixa de Dobramentos Paraguai-Araguaia (ALMEIDA, 1967; CAPUTO, 1984, BRITO-NEVES *et al.*, 1984). Tais autores consideraram a existência de esforços compressivos de direção E-W, reativando estruturas pré-cambrianas, e alívio destes esforços na direção N-S, iniciando um *rift*, e posterior resfriamento de massas plutônicas após esforços distensionais ocorrendo subsidência regional.

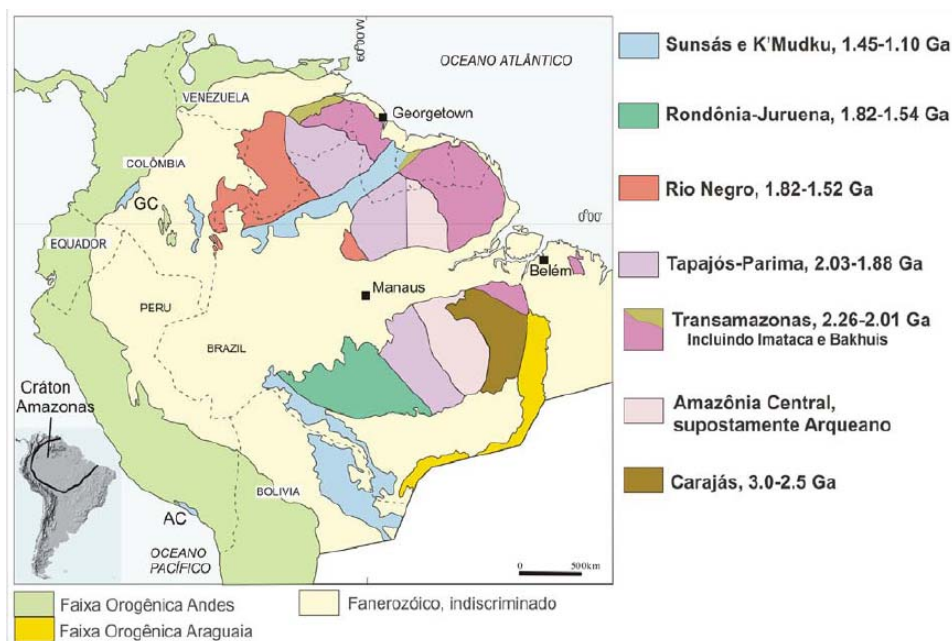


Figura 4-3: Mapa das províncias geocronológicas e suas respectivas idades, proposto por Santos *et al.* (2006).

4.2 GEOLOGIA DA BACIA

Seguido do estágio de transição instalaram-se bacias paleozóicas gondwânicas na Placa Sul-Americana, no período entre o Ordoviciano e o Triássico, em ambientes continentais e marinhos (ALMEIDA *et al.*, 2000). Esta estabilização é marcada por um período de calma tectônica, com ausência de magmatismo e eventos deformacionais. Durante este período ocorreu a formação dos arcos de grande porte, explicados por Cunha *et al.* (1994) e Zalán (2004) como reativações das falhas do embasamento, devido à compressão e soerguimento provocados pelas orogenias na margem andina da placa gondwânica. Estas orogenias, segundo estes mesmos autores, também foram responsáveis pelas regressões marinhas que definiram as discordâncias na bacia.

O Arco de Purus influenciou a deposição das primeiras unidades paleozóicas (Grupo Trombetas) da Bacia do Amazonas, pois impedia a conexão dos sedimentos com a Bacia do Solimões, depositadas em onlap sobre o arco (CUNHA *et al.*, 1994). A deposição neste estágio inicial ocorrida na sinéclise teve caráter

pulsante, alternando ambientes glacial e marinho, com ingressões de sedimentos de Leste para Oeste, ultrapassando o Arco de Gurupá, com unidades correlacionáveis às das bacias do Nordeste africano.

Caputo *et al.* (1972), revisaram o conteúdo litológico do acervo de dados então existente e promoveram um aperfeiçoamento da coluna litoestratigráfica da bacia a qual já definia três grandes ciclos deposicionais no Paleozóico. A carta estratigráfica da Bacia do Amazonas, elaborada por Cunha *et al.* (1994), da Figura 4-4 mostra que a coluna sedimentar foi subdividida em quatro seqüências de segunda ordem separadas por discordâncias: Ordoviciano-Siluriano, Devoniano-Carbonífero, Permo-Carbonífero e Cretáceo-Terciário.

A Seqüência Ordoviciano-Siluriano é constituída pelo Grupo Trombetas composto pelas formações Autás-Mirim (arenitos e folhelhos neríticos neo-ordovicianos), Nhamundá (arenitos neríticos e depósitos glaciogênicos), Pitinga (folhelhos e diamictitos marinhos) e Manacapuru (arenitos e pelitos neríticos e litorâneos). Iniciou-se no Neo-ordoviciano e culminou no Eodevoniano com transgressões marinhas vindas de Leste a partir do Norte da África e estendeu-se até as margens do Alto Purus, limite oeste da Bacia do Amazonas (CAPUTO, 1984). É composta por sedimentos glaciais e marinhos em “*onlap*” sobre o Arco de Purus, impedindo a conexão com a Bacia do Solimões.

A Seqüência Devoniano-Carbonífero envolve os grupos Urupadi e Curuá e é separada da seqüência inferior por uma discordância atribuída à Orogenia Caledoniana por Cunha *et al.* (1994). Nesse estágio ocorre o recuo do mar e a bacia sofre intensa erosão. Nesta época a bacia situava-se no interior da placa Gondwana, bastante rígida, longe de margens tectonicamente ativas onde se desenvolvem orogêneses. Estes grupos possuem correlação com as bacias africanas sem conexão com a do Solimões.

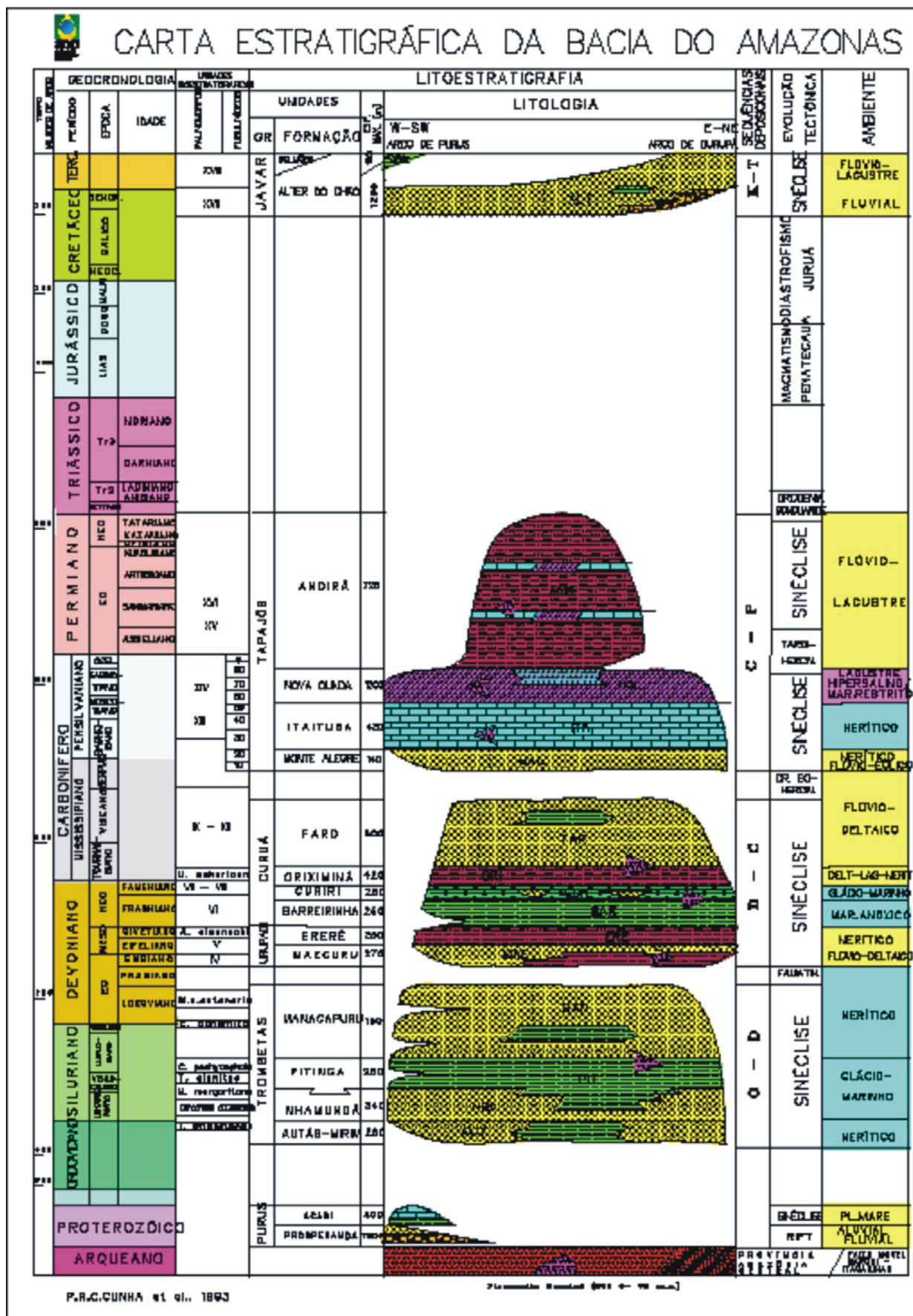


Figura 4-4: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas e embasamento, segundo Cunha *et al.* (1994).

No Grupo Urupadi ocorrem as formações Maecuru (arenitos e pelitos neríticos deltaicos) e Ererê (siltitos, folhelhos e arenitos neríticos e deltaicos). Após um pulso regressivo foi depositado o Grupo Curuá, constituído pelas formações Barreirinha (folhelho negro), Curiri (diamictitos, folhelhos e siltitos de ambientes glaciais), Oriximiná (arenitos e pelitos fluviais regressivos) e Faro (arenitos flúvio-deltaicos).

A Seqüência Permo-Carbonífera (Grupo Tapajós) é separada da anterior por uma discordância atribuída à Orogenia Eoherciniana responsável pelo início da aglutinação do Pangea (CUNHA *et al.*, 1994). Esta orogenia iniciou primeiro no Sul da Europa e depois no Leste dos Estados Unidos (Pensilvaniano). A porção Meridional dos Estados Unidos colidiu com o Norte da América do Sul (Orogenia Ouachita), no Pensilvaniano, sem interromper a sedimentação de mesma idade na Bacia do Amazonas (Formação Nova Olinda), constituída por evaporitos, com cerca de 400 metros de espessura, distribuída em várias camadas.

Mudanças climáticas de frio para quente e árido caracterizam este novo ciclo transgressivo-regressivo representado pelo Grupo Tapajós, o qual está separado por discordância do Grupo Curuá, e contêm as formações Monte Alegre (arenitos eólicos intercalados com siltitos e folhelhos interdunas e lagos de ambiente continental desértico gradando para marinho raso em direção ao topo e contendo os principais reservatórios de hidrocarbonetos da bacia, segundo CUNHA, 1996), Itaituba e Nova Olinda (calcários de inframaré e evaporitos de planície de Sabkha) e Formação Andirá (siltitos, arenitos e folhelhos avermelhados de sedimentação continental com raros evaporitos e carbonatos, indicando deposição majoritariamente em ambiente flúvio-lacustrino a marinho restrito). O Grupo Tapajós encerra a deposição paleozóica na Bacia do Amazonas.

A Orogenia Gonduanide marcou o término da sedimentação paleozóica na Bacia do Amazonas (CUNHA *et al.*, 1994) localizada na margem do Oceano Pacífico do Continente Gondwana. Aparentemente, do Eotriássico ao Eocretáceo teria cessado a subsidência da bacia, mas neste intervalo ela sofreu distensão E-W e

ocorreu o magmatismo básico Penatecaua Issler *et al.* (citado por SANTOS, 1984), de idade Neotriássica e jurássica, com numerosas intrusões na forma de soleiras e enxames de diques de diabásio orientados segundo N-S com espessura total superior a 500 metros. O magmatismo é controlado pelos altos estruturais edificados anteriormente à intrusão das soleiras (WANDERLEY FILHO *et al.*, 2006).

Alguns diques guardam estreita relação com as direções SW-NE e SE-NW; datação K/Ar fornece idade de 230 ± 30 Ma, situando-os no Triássico inferior (CUNHA & TARAPANOFF, 1985). No Arco de Purus a espessura total das soleiras de diabásio é reduzida e no cruzamento dos grandes lineamentos pré-cambrianos essas rochas atingem as suas maiores espessuras (ALMEIDA, 1986).

A colisão final dos continentes Gondwana e Laurásia (Orogenia Herciniana) no Neopermiano-Eotriássico afetou a porção norte da Plataforma Sul-Americana, gerando esforços de direção N-S que podem ter afetado o Escudo das Guianas e a Bacia do Amazonas. Após a deposição paleozóica e a orogenia que originou o Pangea houve como já mencionado, ruptura da placa durante o Neotriássico ao Eojurássico, caracterizado por eventos distensionais na direção E-W, acompanhado de magmatismo básico (ZALÁN, 2004).

Este magmatismo que afetou a Bacia do Amazonas entre o Permiano e o Cretáceo foi intenso, condicionado por lineamentos NS e N-NE (TEIXEIRA, 1978), e suplantou os limites da área sedimentar, atingindo espessuras superiores a 800 m e volume de cerca de 90.000 km^3 (WANDERLEY FILHO, 1991). Segundo Aires (1984), o magmatismo se desenvolveu como resultado de processos distensivos, preferencialmente nos cruzamentos de grandes lineamentos. Rezende (1971) atribuiu um caráter cíclico ao vulcanismo e o associou aos estágios críticos do regime de fragmentação do Gondwana. Amaral (1974) relacionou os principais eventos magmáticos fanerozóicos ao desenvolvimento do Cinturão Andino.

Chamado por Almeida *et al.* (2000) de estágio de ativação, após a deposição paleozóica e a Orogenia Herciniana começou, no interior da plataforma, intensa ativação de processos tectônicos que deram origem as margens passivas e ativas

do atual continente Sul Americano. Durante a abertura do Atlântico Central houve a geração do *rift* de Marajó, que é separado da Bacia do Amazonas pelo Arco de Gurupá (CUNHA *et al.*, 1994).

Após o evento distensivo da abertura do Atlântico Norte, a região NW da placa Sul-Americana foi dominada por esforços compressivos (CAPUTO, 1984), cuja origem estaria relacionada ao início da convergência do continente com a placa do Oceano Pacífico, gerando um sistema de falhas transcorrentes, chamado de Diastrofismo Juruá. Esta estruturação, de direção NE-SW, ocorreu no fim do Jurássico e antes do Aptiano, pois seus registros estão marcados nas rochas básicas intrudidas na sequência sedimentar paleozóica durante o evento magmático e não afetaram as rochas da Formação Alter do Chão, de idade aptiana.

As unidades cretácea e cenozóica da Bacia do Amazonas são atribuídas ao relaxamento dos esforços compressivos, onde foram criados sítios deposicionais que acomodaram rochas do Grupo Javari, depositadas sobre a discordância do topo do Paleozóico (CUNHA *et al.*, 1994). Este grupo compreende a Formação Alter do Chão (arenitos e pelitos avermelhados bioturbados) instalada em um sistema fluvial arenoso de alta energia e a Formação Solimões (pelitos com restos de conchas, moluscos e vegetais).

Os arenitos e pelitos vermelhos bioturbados da Formação Alter do Chão foram depositados em paleoambiente de planícies abandonadas e rios entrelaçados, sob regime de clima seco a úmido durante o Cretáceo (HORBE *et al.*, 2006). Com essa mudança climática, de árido para úmido, a drenagem passa a correr em direção ao Oeste. Com o soerguimento da Cadeia Andina, a região foi isolada no Paleógeno e o depocentro terciário foi deslocado para a região subandina. Rios cretáceos transformaram-se em lagos doces e rasos, depositando as rochas pelíticas com restos de conchas, moluscos e vegetais da Formação Solimões. A partir do Mioceno, época da culminância do soerguimento andino, a bacia passou a ser alimentada por sedimentos oriundos daquela cadeia montanhosa e a rede de drenagem passou a se dirigir ao Oceano Atlântico.

De acordo com Pindell & Tabbut (1995) a intensificação da Orogenia Andina após o início da subducção da Placa do Caribe sob a Sul-Americana, gerou uma compressão de direção E-W que causou soerguimento da cordilheira, intensa erosão e conseqüente inversão da drenagem dos Andes para o Oceano Atlântico.

Na atual Bacia do Marajó, limite Leste da Bacia do Amazonas, desenvolveu-se um hot spot, relacionado à abertura do Oceano Atlântico Central, que soergueu toda a seção paleozóica previamente depositada, erodindo mais de 5.000 metros de sedimentos até o embasamento. A ombreira Oeste do rifte do Marajó corresponde ao Arco de Gurupá, que atualmente limita a Bacia do Amazonas a Leste (COSTA, 2002).

4.3 ARCABOUÇO ESTRUTURAL REGIONAL

A estruturação da Bacia do Amazonas é configurada pelo seu eixo central EW de deposição, provavelmente herança das fases iniciais do *rift*, identificada em mapas gravimétricos (BAHIA & ABREU, 1985; COSTA, 2002; COSTA & HASUI, 1997). A estruturação NW intensamente marcada no embasamento adentra a bacia, sob forma de arcos, a qual pode ter sido reativada, deformando e controlando a sedimentação em diferentes idades (WANDERLEY FILHO, 1991 e 1996; SENA COSTA *et al.*, 2001).

Costa & Hasui (1997) realizaram a primeira tentativa de compartimentação tectônica da região amazônica (Figura 4-5), onde os limites de blocos estariam orientados preferencialmente para NW-SE e NE-SW e seriam marcados por cinturões transcorrentes e de cavalgamento.

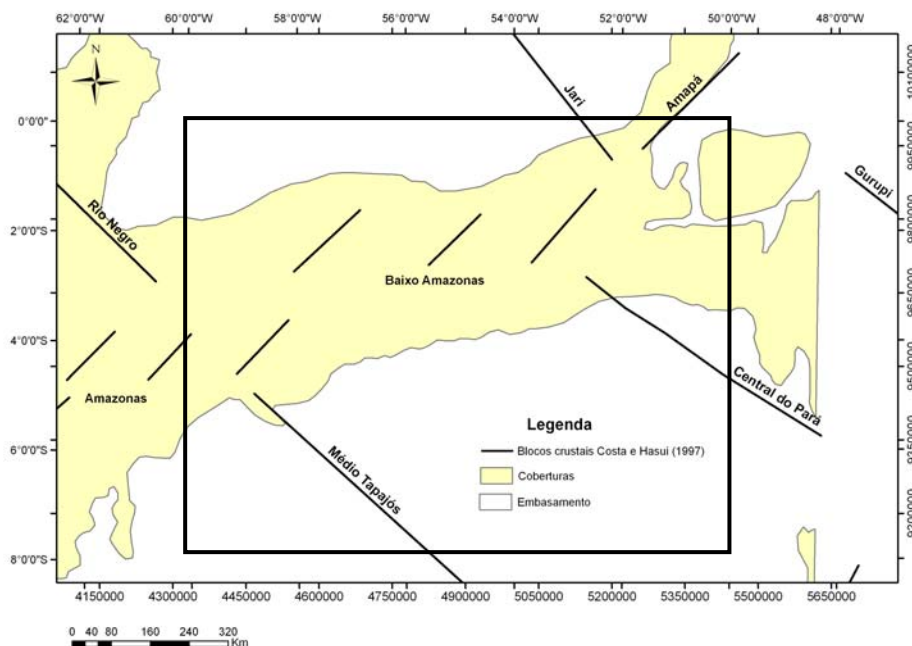


Figura 4-5: Blocos crustais da região amazônica no Brasil. Modificado de Costa & Hasui (1997). Área de estudo em preto.

Segundo tais autores, as estruturas tectônicas seriam separadas por suas idades onde as deformações do Arqueano/Proterozóico Inferior seriam marcadas por zonas de cisalhamento NE-SW e NW-SE; no Meso e Neo Proterozóico teriam se desenvolvido falhas transcorrentes dextrais e sinistrais e hemigrábens e a partir do Mioceno teriam se formado transcorrências dextrais E-W, ENE-WSW e NE-SW e falhas normais e inversas NW-SE e NNW-SSE.

Wanderley Filho (1991) ao utilizar informações de mapeamentos geológicos e de isópacas, dados de poços e geofísicos (sísmicos, gravimétricos e magnéticos), observou direção preferencial NW dos lineamentos, tanto na bacia como no embasamento, com dois feixes principais de falhas normais de idade paleozóica nas bordas Sul e Norte da bacia, falhas transcorrentes de direção NW e cinemática dextral (Faro-Juruti e Manacapuru-Rio Negro) e sinistral (Paru-Anapu), Figura 4-6. Considerou também que os principais lineamentos paleozóicos mapeados na bacia têm direção NE-SW.

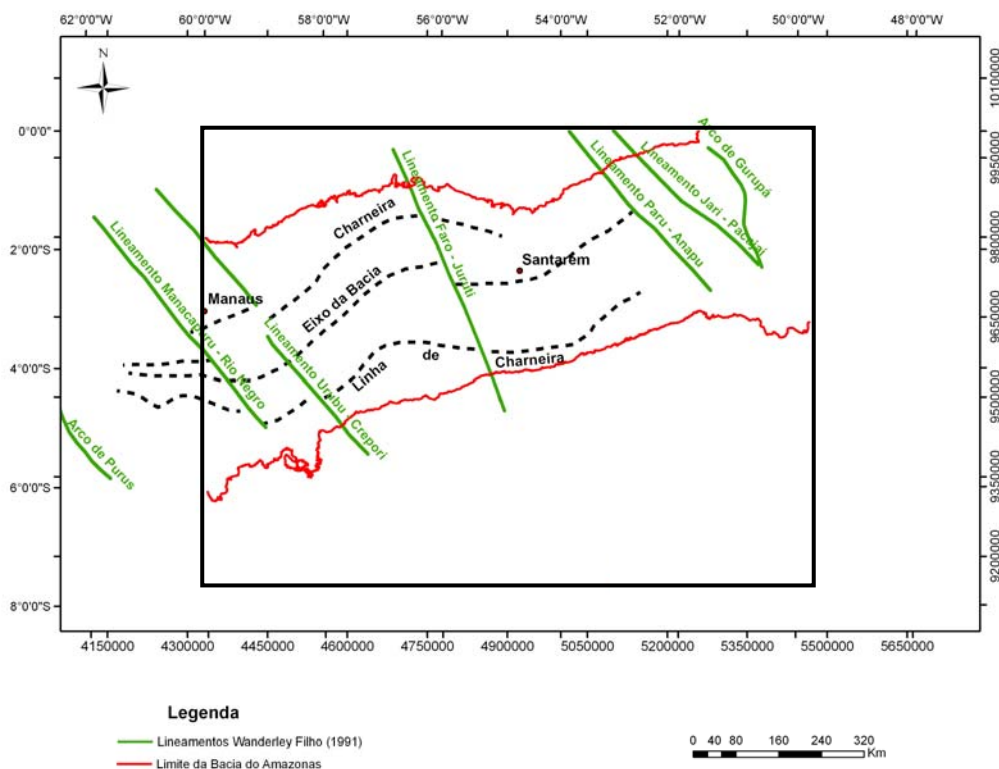


Figura 4-6: Lineamentos interpretados por Wanderley Filho (1991). Área de estudo em preto.

Hasui (1996) interpretou o primeiro ciclo significativo da região no final do Paleoproterozóico ao início do Mesoproterozóico, e relacionou este ciclo a eventos mantélicos e tafrogênicos, processos de erosão/sedimentação, além de expressivo vulcanismo e magmatismo granítico e alcalino originados em três pulsos. A implantação das bacias do Solimões, do Amazonas e do Parnaíba, durante o Paleozóico, está relacionada a uma tectônica extensional, com eixo de distensão σ_3 segundo NW-SE e geração de falhas normais NE-SW, como no Arco de Purus. No terceiro evento evolutivo ocorreu a Reativação Sul-Atlântica (ou Ativação Meso-Cenozóica, segundo ZALÁN, 2004) que mobilizou a grande massa continental e culminou com a abertura do Oceano Atlântico, reativando as três bacias acima mencionadas. No Cenozóico ocorreu um regime tectônico transcorrente, induzido pela rotação da Placa sul-americana para Oeste e pela orogênese andina.

Bahia & Abreu (1985) e Costa (2002) ao analisarem mapas Bouguer observaram máximos gravimétricos no centro da bacia, constituindo um alinhamento ao longo do seu depocentro. Aqueles autores relacionaram as anomalias à presença de corpos densos na base da crosta originados por intrusão de magma básico

associado a seu adelgaçamento. Para Costa & Hasui (1997) estas feições estão relacionadas a suturas arqueanas, reativadas por cavalgamentos e zonas de cisalhamento no Proterozóico, responsáveis pelo soerguimento de rochas da base da crosta, resultando nas anomalias.

Três grandes etapas determinam a evolução crustal da Amazônia, incluindo litotipos do Arqueano ao Holoceno. A primeira etapa relaciona-se à formação e estabilização de grande massa continental no Arqueano e Paleo Proterozóico. Na segunda etapa encontram-se três eventos de tectônica extensional, no Meso Proterozóico, Paleozóico e Mesozóico, em resposta as tentativas de ruptura da massa continental, que ocorreu no Mesozóico. A terceira etapa, neotectônica, corresponderia à deriva continental (COSTA & HASUI, 1997). De acordo com esses autores, é clara a manifestação de tectônica ressurgente, com aproveitamento de descontinuidades e anisotropias pré-existentes em cada episódio, além de forte influência das grandes zonas de fraqueza crustal. São notáveis as direções NE-SW e NW-SE que, segundo os autores, refletem a influência de estruturas do embasamento.

Costa (1996) considerou que a neotectônica da Amazônia engloba sistemas estruturais, seqüências sedimentares de relevo e elementos das bacias hidrográficas desenvolvidos durante o Terciário Superior, Neógeno (Mioceno-Plioceno) e Pleistoceno Superior ao recente. As principais estruturas da Bacia do Amazonas são falhas normais com direção ENE-WSW e de transferência de direção NW-SE (COSTA & HASUI, 1997). Uma das estruturas que se destaca é o Arco de Purus, que separa as bacias do Amazonas e do Solimões, onde não há registro das seqüências do Siluro-Ordoviciano e Devoniano-Eocarbonífero. Durante a fase de abertura da bacia, as zonas de fraqueza mais antigas foram reativadas, promovendo sua compartimentação em quatro grandes blocos estruturais, desde o Arco de Gurupá até o Arco de Purus (WANDERLEY FILHO, 1996).

A evolução da rede de drenagem e esculturação do relevo estão intimamente ligadas a manifestações neotectônicas. Segundo Hasui (1990) estas

manifestações ocorreram na Amazônia devido a uma distensão de direção NW-SE em função de um binário E-W, favorecendo o desenvolvimento de estruturas transcorrentes dextrais e a reativação de outras.

Rezende & Brito (1973) ao interpretarem feições morfológicas de drenagem no rio Amazonas e relacioná-las a eventos tectônicos, reconheceram um padrão onde as drenagens estão orientadas segundo as direções NE e NW, causado por sistemas de fraturas. Neste trabalho os autores identificaram a projeção das anomalias morfoestruturais em subsuperfície a partir de seções sísmicas de reflexão, interpretando as descontinuidades de direção NW na seção paleozóica como falhas transcorrentes, compatíveis com eventos distensivos e o contexto cratônico da bacia (Figura 4-7).

O trabalho de Costa *et al.* (1995) é baseado em investigações de campo, análises de mapas plani-altimétricos e sensores remotos para reconhecimento das estruturas geradas por movimentação cenozóica presentes na região amazônica. Segundo o autor, as descontinuidades do Cráton do Amazonas tiveram papel importante na distribuição e arranjos neotectônicos, mediante reativações. O autor afirma que a deformação intraplaca causada pela rotação da Placa Sul-Americana para Oeste, gerou um par conjugado dextral de direção E-W e, a partir do Mioceno, componentes de tensão passaram a operar no interior da plataforma, com transpressão na direção NW e transtensão na direção NE (Figura 4-8).

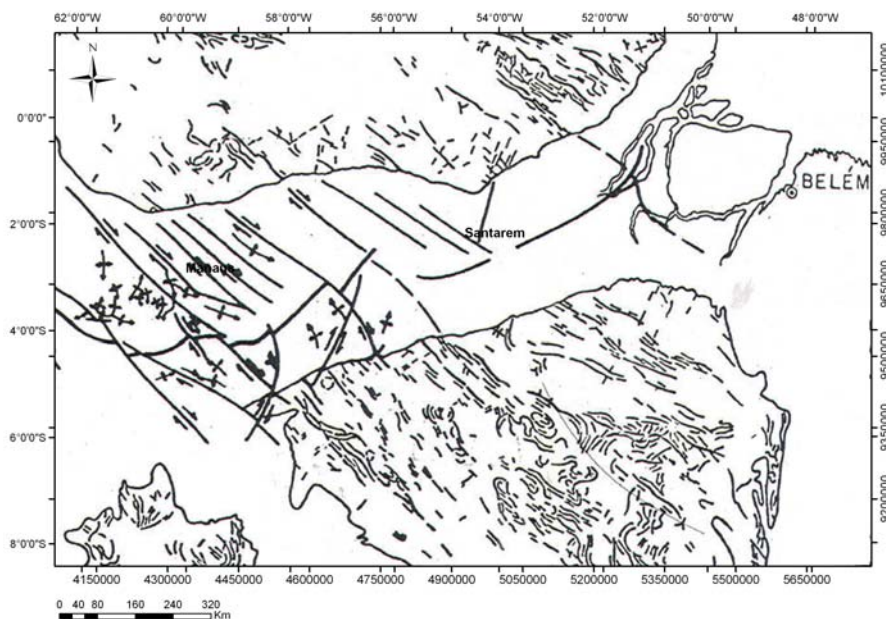


Figura 4-7: Arcabouço tectônico proposto por Rezende & Brito (1973).

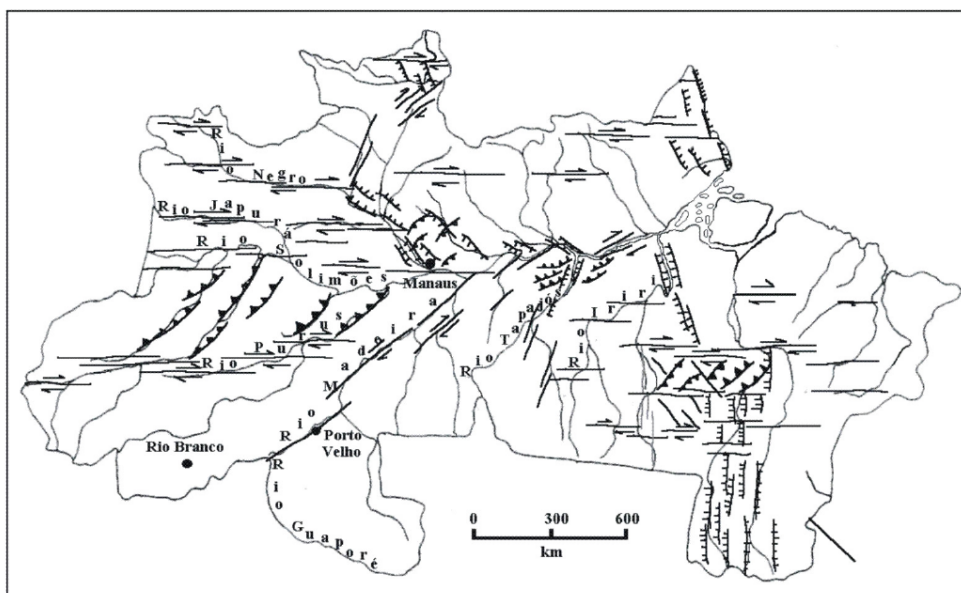


Figura 4-8: Arcabouço tectônico da região Amazônica, mostrando as falhas maiores (COSTA et al., 1995).

Com o objetivo de identificar estruturas cenozóicas, Costa (2002 e 2003) procedeu a análise e interpretação de seções sísmicas da Bacia do Amazonas e identificou estilos estruturais distintos, dividindo a bacia em três domínios e oito setores estruturais. Nos setores rio Abacaxis-Tapajós e Mamuru identificou um sistema de falhas transcorrentes denominado de Urucará, com direção NW-SE, ativo do Eopaleozóico até o Cenozóico. As falhas transcorrentes NE estão amplamente distribuídas no trecho da bacia onde ocorre o sistema NW.

Miranda (1983) caracterizou e interpretou anomalias morfoestruturais na região amazônica utilizando imagens de sensores remotos (Landsat e Radar). Verificou que a disposição alinhada de algumas anomalias delineava importantes *trends* morfoestruturais com orientações ENE e NNW. A partir de análise estatística de feições lineares das imagens, caracterizaram-se seis direções principais de lineamentos que configuram faixas estruturais, duas destas com boa correspondência aos *trends* morfoestruturais referidos. Considerou, ainda, que as feições alinhadas são coincidentes com estruturações do embasamento da Bacia do Amazonas, sugerindo reativação fanerozóica.

Apesar dos vários estudos sobre a Bacia do Amazonas, persistem os desafios para a compreensão de sua evolução estrutural, principalmente com respeito aos processos de reativação de estruturas pré-existentes e caracterização cinemática de eventos rúpteis recorrentes.

4.4 MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

A base geológica da área de estudo foi construída com base na Carta do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2004). As folhas utilizadas foram as SA-21: Santarém, SA-22: Belém, SB-21: Tapajós e SB-22: Araguaia, conforme integradas na Figura 4-9 e na Figura 4-10.

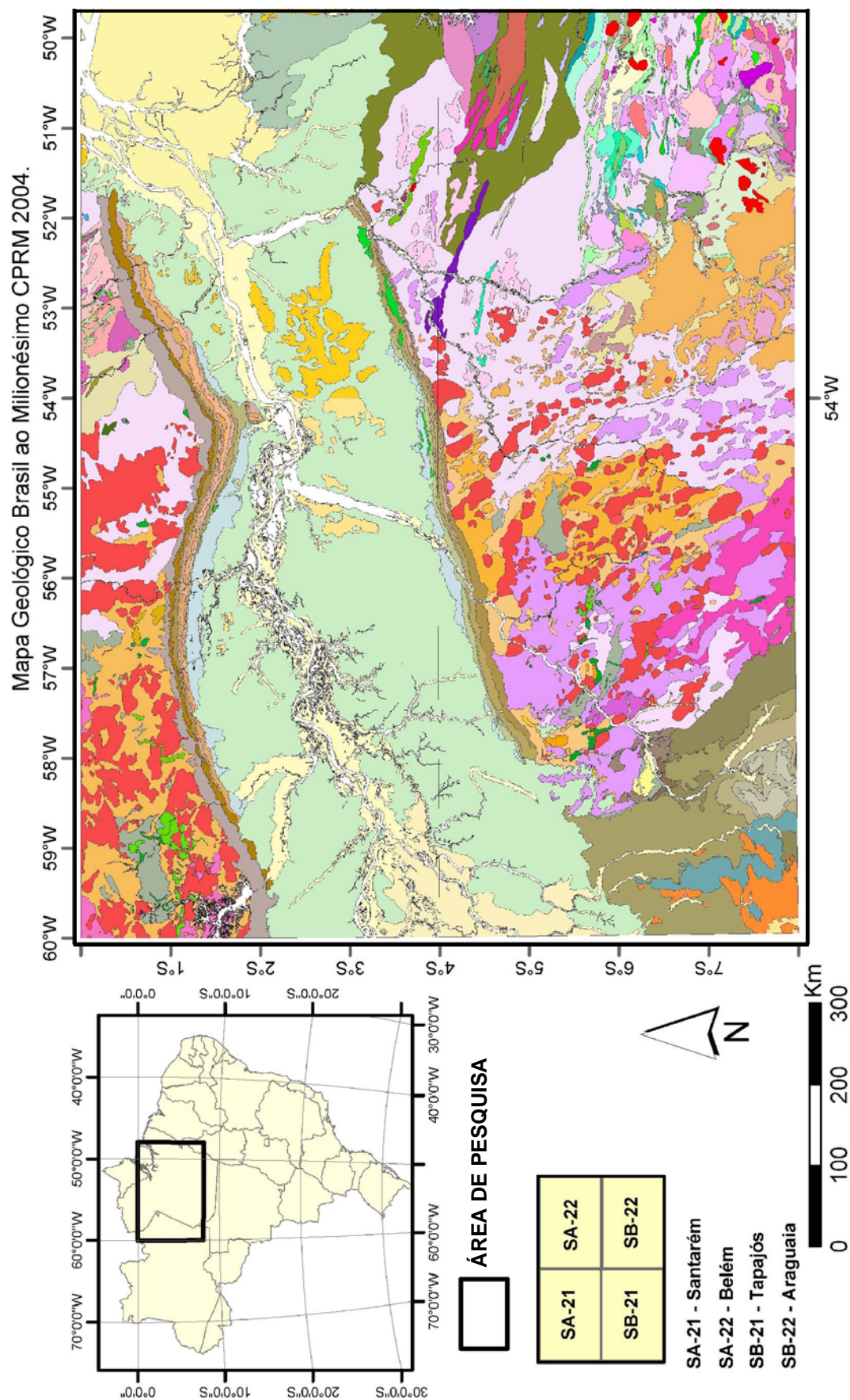


Figura 4-9: Mapa geológico da área de estudo resultante da integração folhas Santarém, Belém, Tapajós e Araguaia (CPRM, 2004)

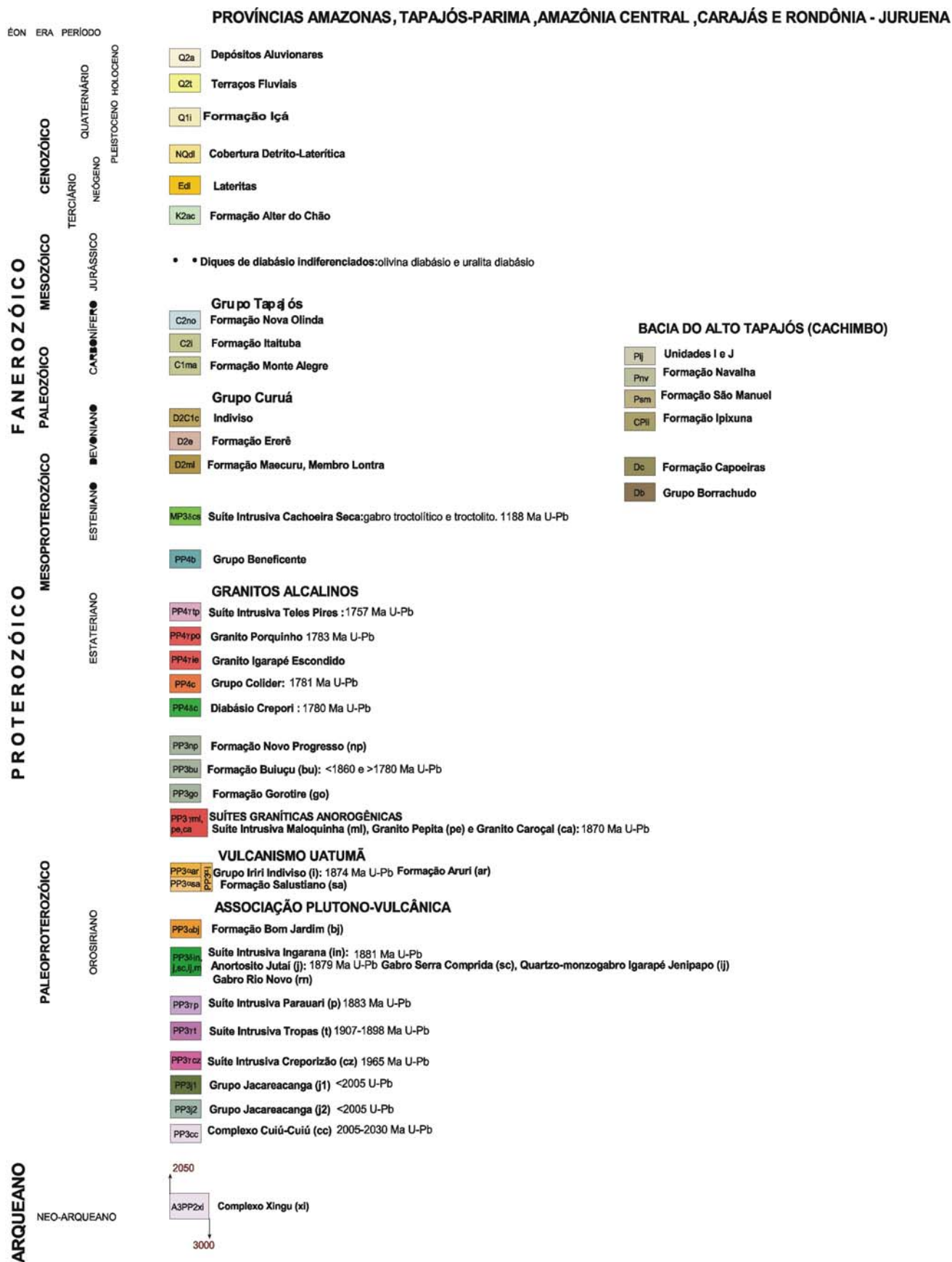


Figura 4-10: Legenda do mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2004).

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 SÍNTESE DA INTEGRAÇÃO GEOFÍSICO-GEOLÓGICA DA BACIA DO AMAZONAS

5.1.1 Integração estrutural-gravimétrica

Neste tópico se apresenta o mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo (Figura 5.1-1) e os mapas gravimétricos derivados da aplicação dos métodos de realce de anomalias descritos no Capítulo 2 (Figura 5.1-2), cujo processamento temático e integração com as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas, extraídas de Wanderley Filho (1991), de acordo com a Figura 5.1-3, ensejaram elaborar um mapa preliminar de interpretação gravimétrica qualitativa (Figura 5.1-4). Observa-se na Figura 5.1-1 e na Figura 5.1-2 que o eixo da bacia é representado por altos gravimétricos. A Figura 5.1-5 mostra o mapa geológico da área de estudo, em correspondência à interpretação gravimétrica qualitativa, indicando as possíveis continuidades de estruturas geológicas e geofísicas do embasamento exposto na Bacia do Amazonas.

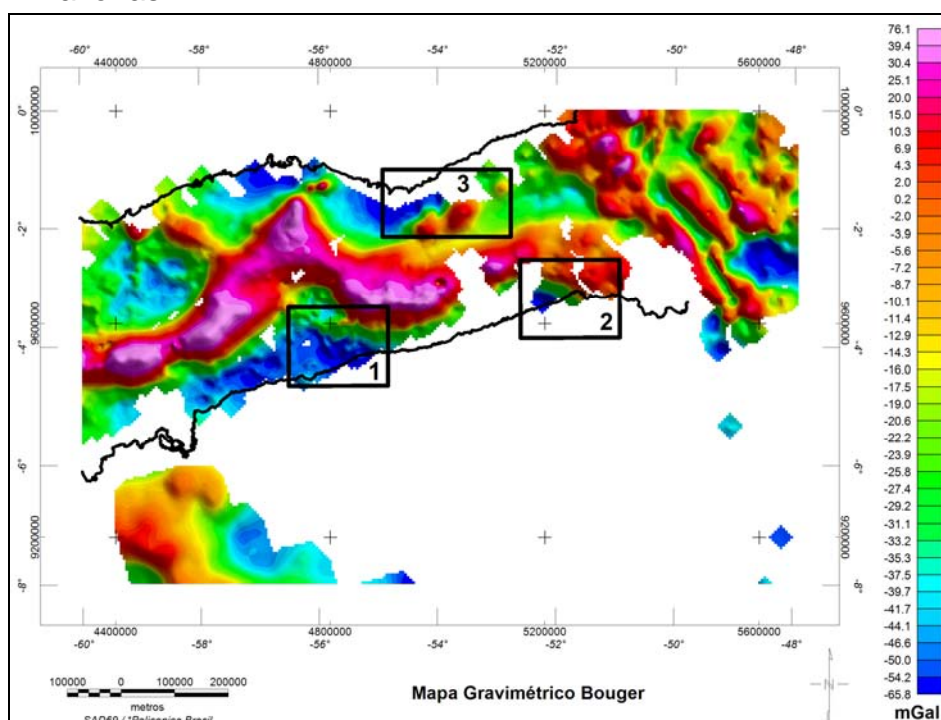


Figura 5.1-1: Mapa gravimétrico Bouguer da área de estudo indicando as subáreas Tapajós (1), Xingu (2) e Monte Alegre (3). Limites da Bacia do Amazonas em preto.

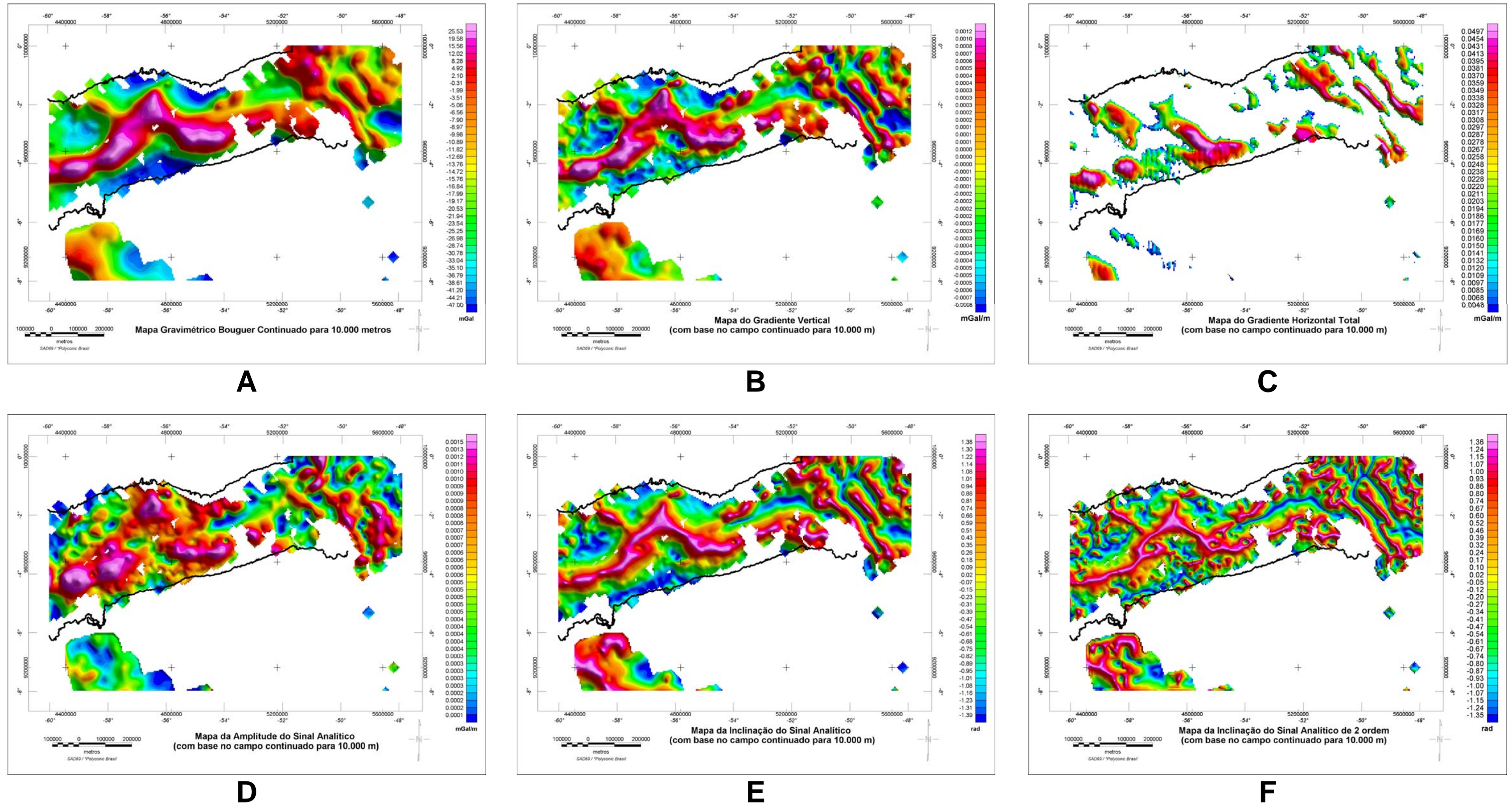


Figura 5.1-2: Mapas gravimétricos da área de estudo: (A) mapa Bouguer continuado para **10.000 metros**; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem. Limites da Bacia do Amazonas em preto.

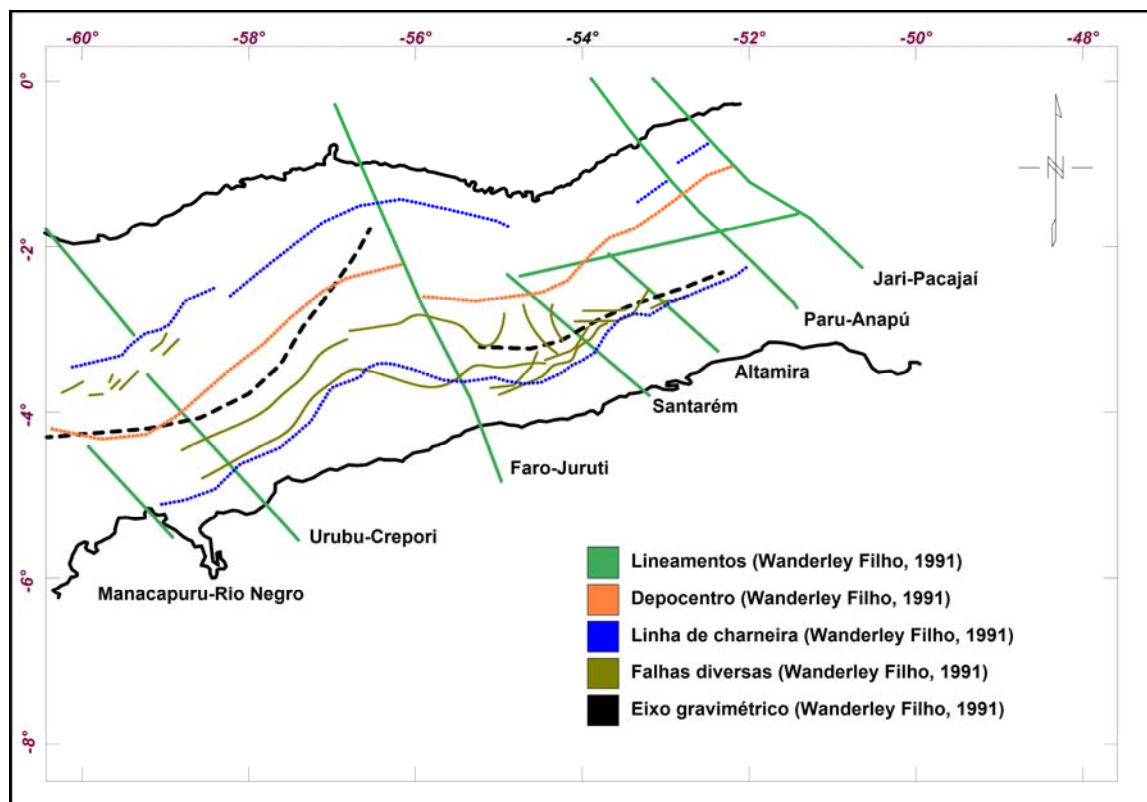


Figura 5.1-3: Mapa das principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991)

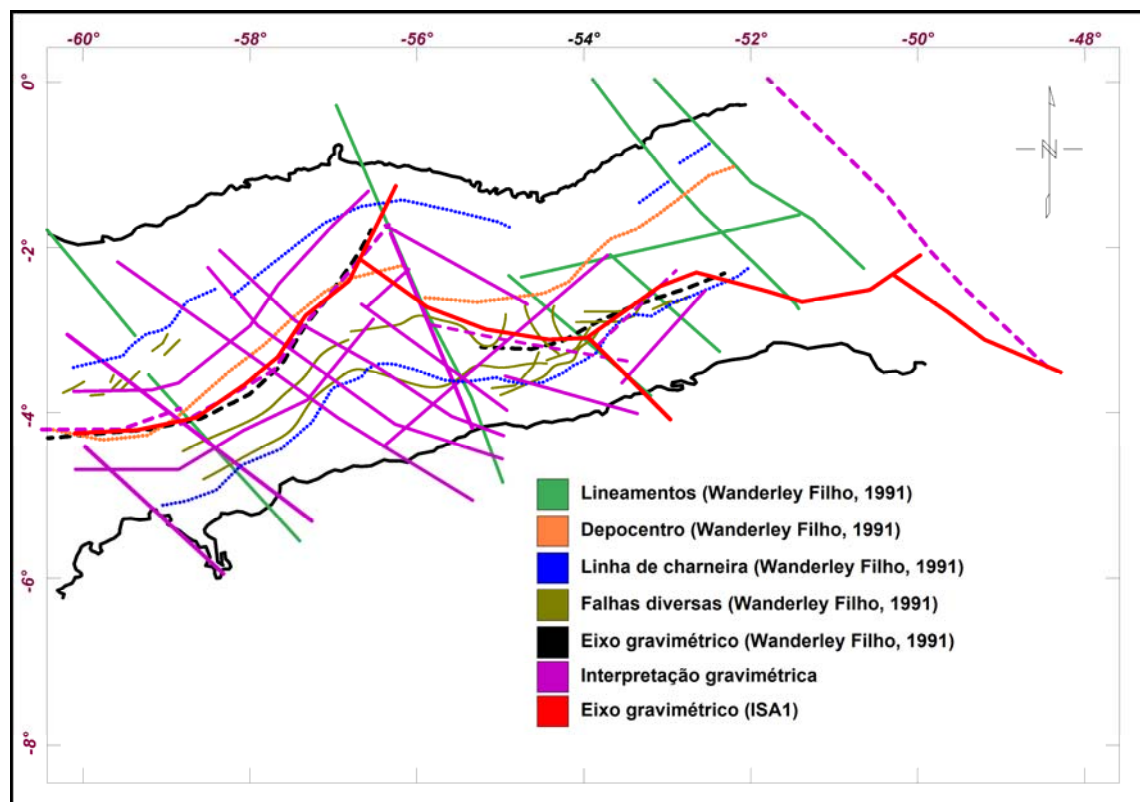


Figura 5.1-4: Mapa de interpretação gravimétrica qualitativa (linhas violetas) indicando as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).

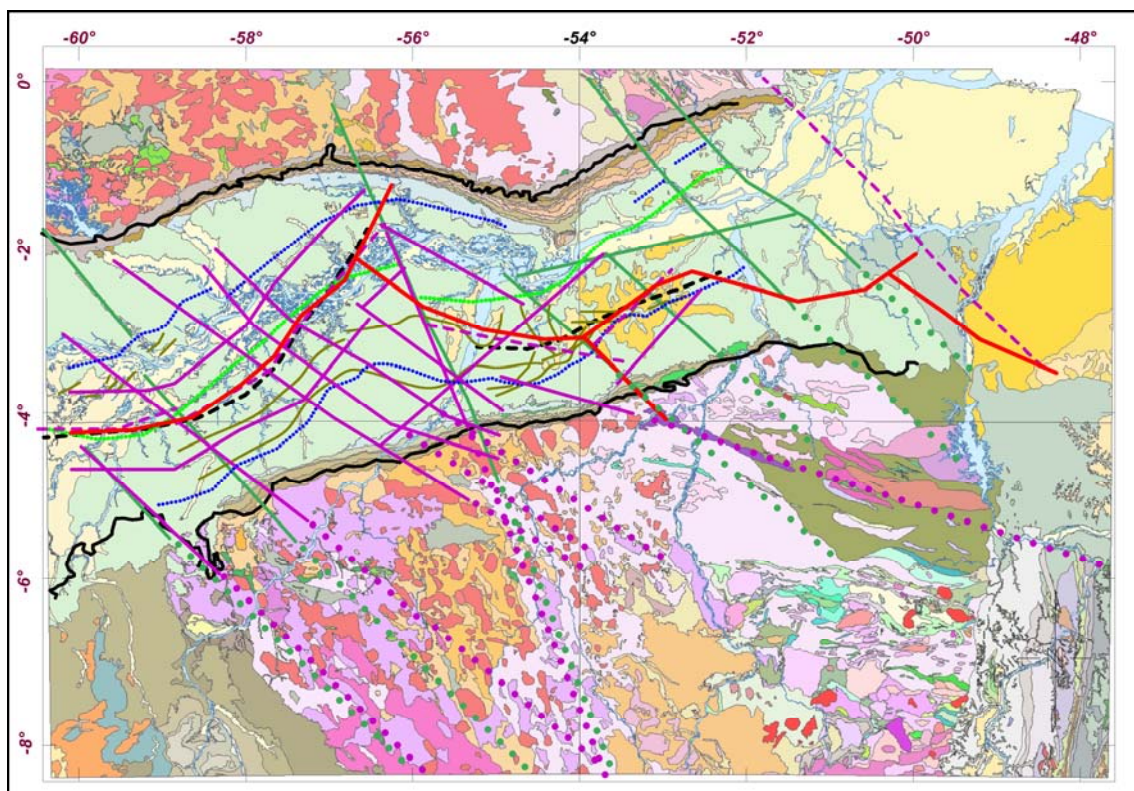


Figura 5.1-5: Mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2004) mostrando a possível continuidade de estruturas gravimétricas (sugeridas na Figura 5.1-4) do embasamento exposto na Bacia do Amazonas. A legenda do mapa geológico encontra-se na Figura 4-10.

A análise semi-quantitativa empregou métodos estatísticos de obtenção de profundidades de fontes magnéticas: o método do espectro de potência radial e o método da deconvolução de Euler.

Na Figura 5.1-6 está representado o espectro de potência radial, aplicado no sentido de discriminar fontes anômalas profundas (sinais de baixas frequências espaciais), intermediárias (sinais de frequências espaciais intermediárias) e rasas (sinais de altas frequências espaciais), gerado a partir do mapa gravimétrico Bouguer da Figura 5.1-1.

De acordo com a Figura 5.1-6 são discriminadas três partições marcadas pelas mudanças no declive da função espectral, as quais correspondem às profundidades das fontes, que são: profundas com profundidades médias de 49 km; intermediárias com profundidades médias de 25 km e rasas + ruídos, na última

partição do espectro, as quais apresentam profundidades médias de 10 km, apesar de estarem relacionadas a profundidades variadas devido aos ruídos.

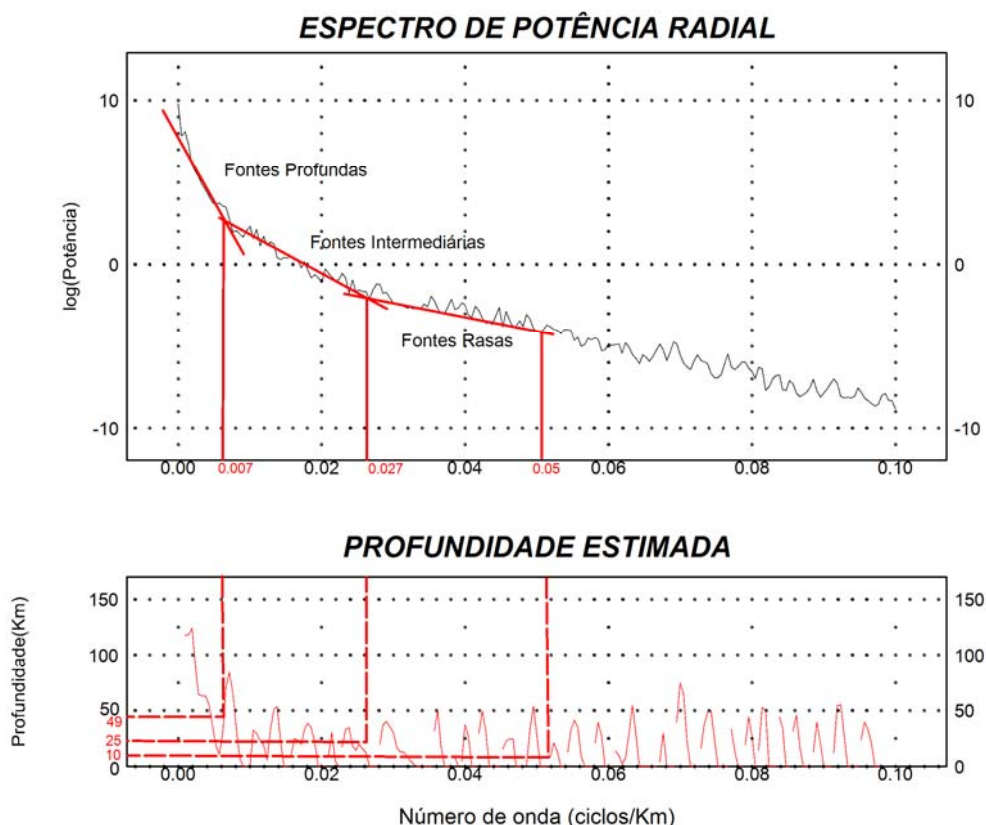


Figura 5.1-6: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa gravimétrico Bouguer da Figura 5.1-1.

O método de deconvolução de Euler foi aplicado aos dados do campo gravimétrico Bouguer da Figura 5.1-1, para os modelos dique e *pipe* (cilindro), como mostra a Figura 5.1-7 e a Figura 5.1-8. As principais soluções limitam o alto gravimétrico, o qual encerra o eixo deposicional da bacia, correspondente a preservação das maiores espessuras de rochas sedimentares.

As profundidades obtidas, apesar de muito elevadas, guardam uma relação entre os dois métodos aplicados, permanecendo as estruturas mais profundas num contexto crosta/manto, definidas principalmente no modelo *pipe*. As estruturas rasas, que variam em torno de 5 km, correspondem ao limite da Bacia do Amazonas e seu embasamento.

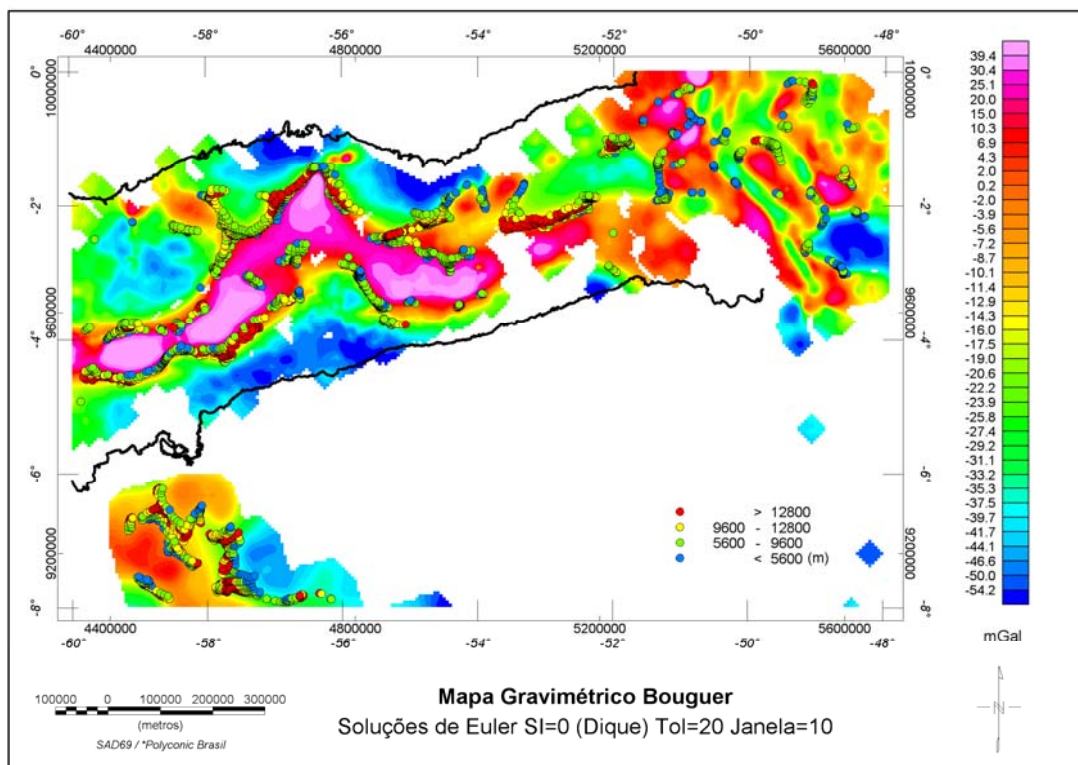


Figura 5.1-7: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo dique.

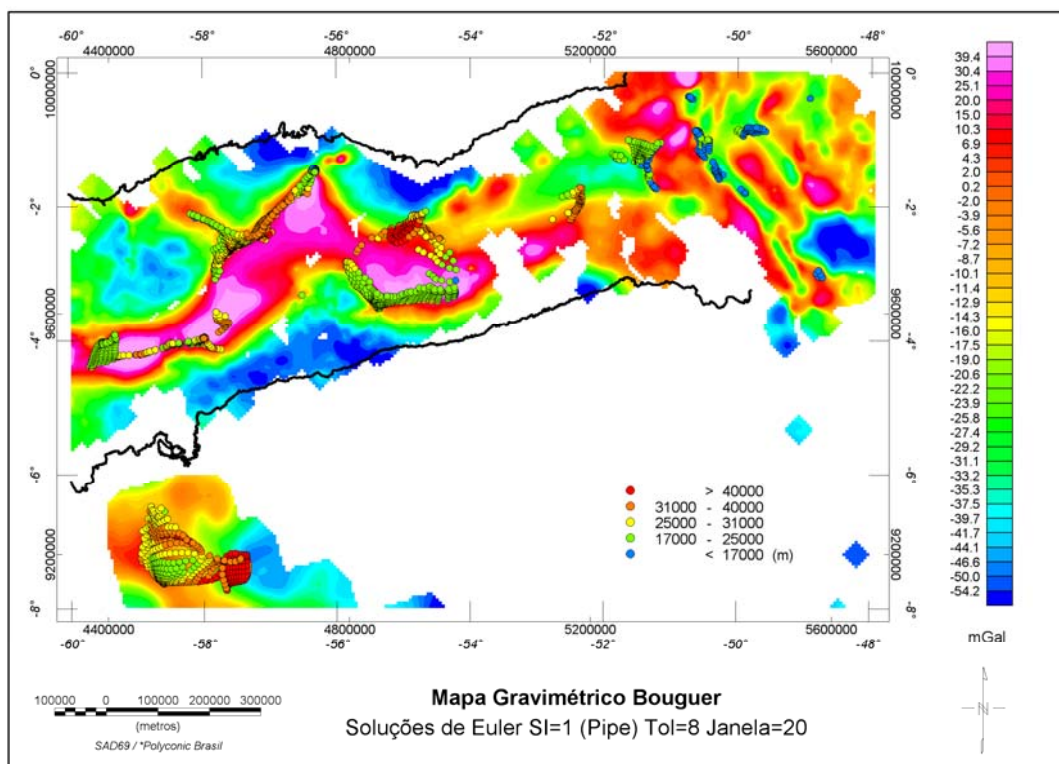


Figura 5.1-8: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo pipe.

Finalmente, cabe salientar que, muitas vezes, a presença de estruturas truncadas pode prejudicar a estimativa de profundidade de fontes.

5.1.2 Integração estrutural-magnética

Neste tópico são apresentados os mapas: magnético residual da área de estudo (Figura 5.1-9) e reduzido ao polo – RTP (Figura 5.1-10); e os mapas magnéticos derivados da aplicação dos métodos de realce de anomalias, descritos no Capítulo 2 sobre o mapa magnético RTP continuado para 10.000 metros (Figura 5.1-11).

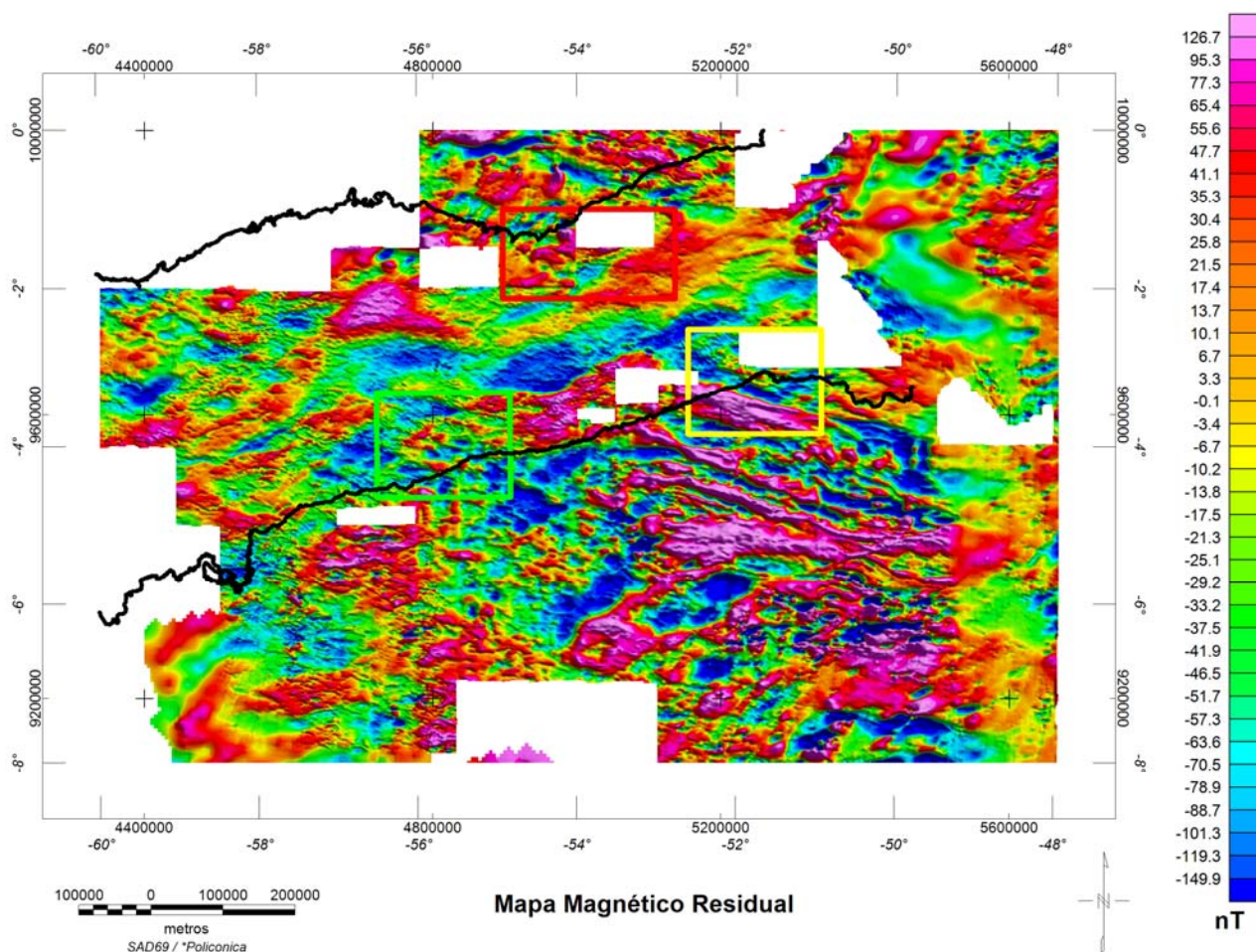


Figura 5.1-9: Mapa magnético residual da área de estudo indicando as subáreas Tapajós (verde), Xingu (amarelo) e Monte Alegre (vermelho) no contexto da Bacia do Amazonas (limites em preto).

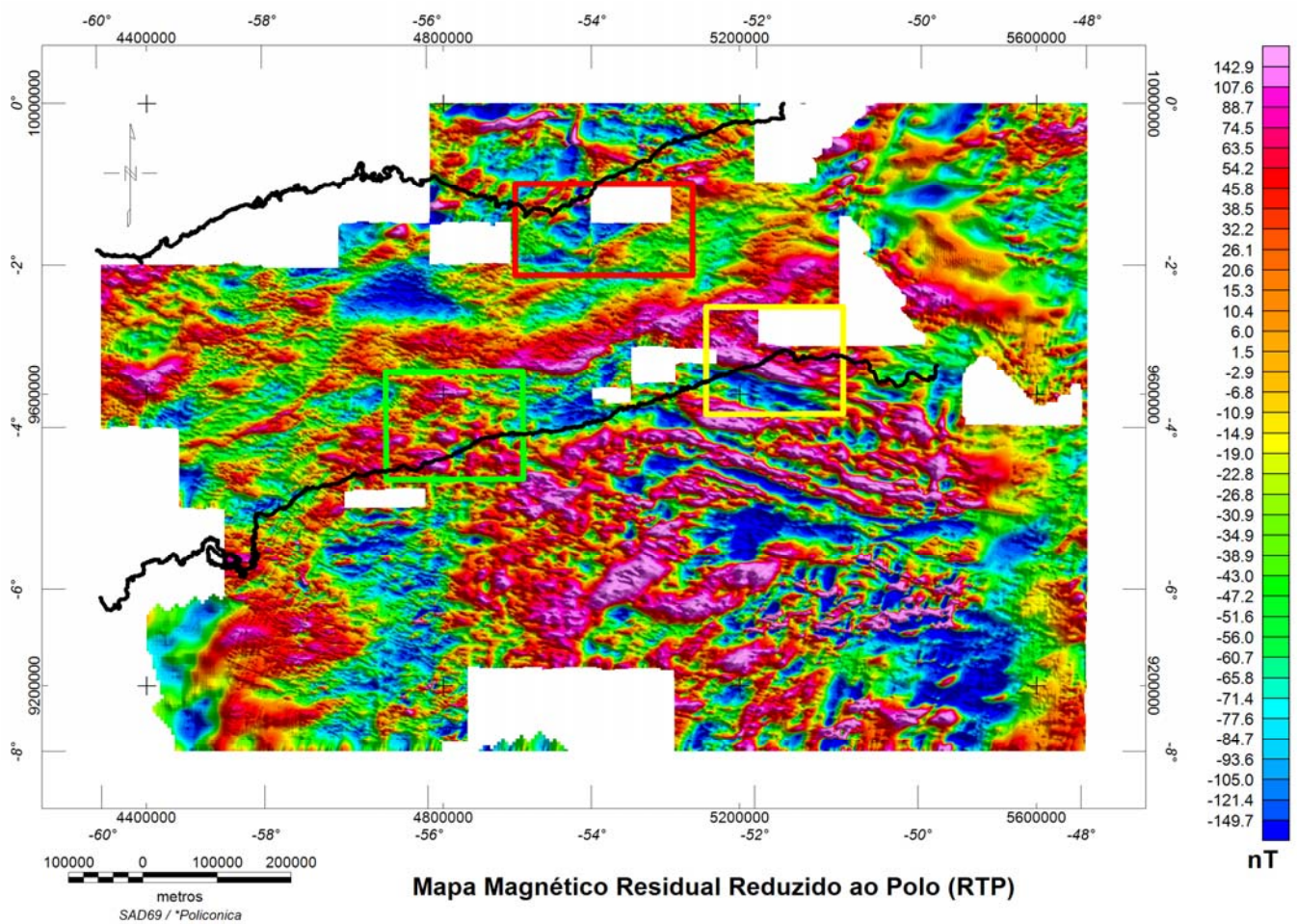


Figura 5.1-10: Mapa magnético residual RTP da área de estudo indicando as subáreas Tapajós (verde), Xingu (amarelo) e M. Alegre (vermelho) no contexto da Bacia do Amazonas (limites em preto).

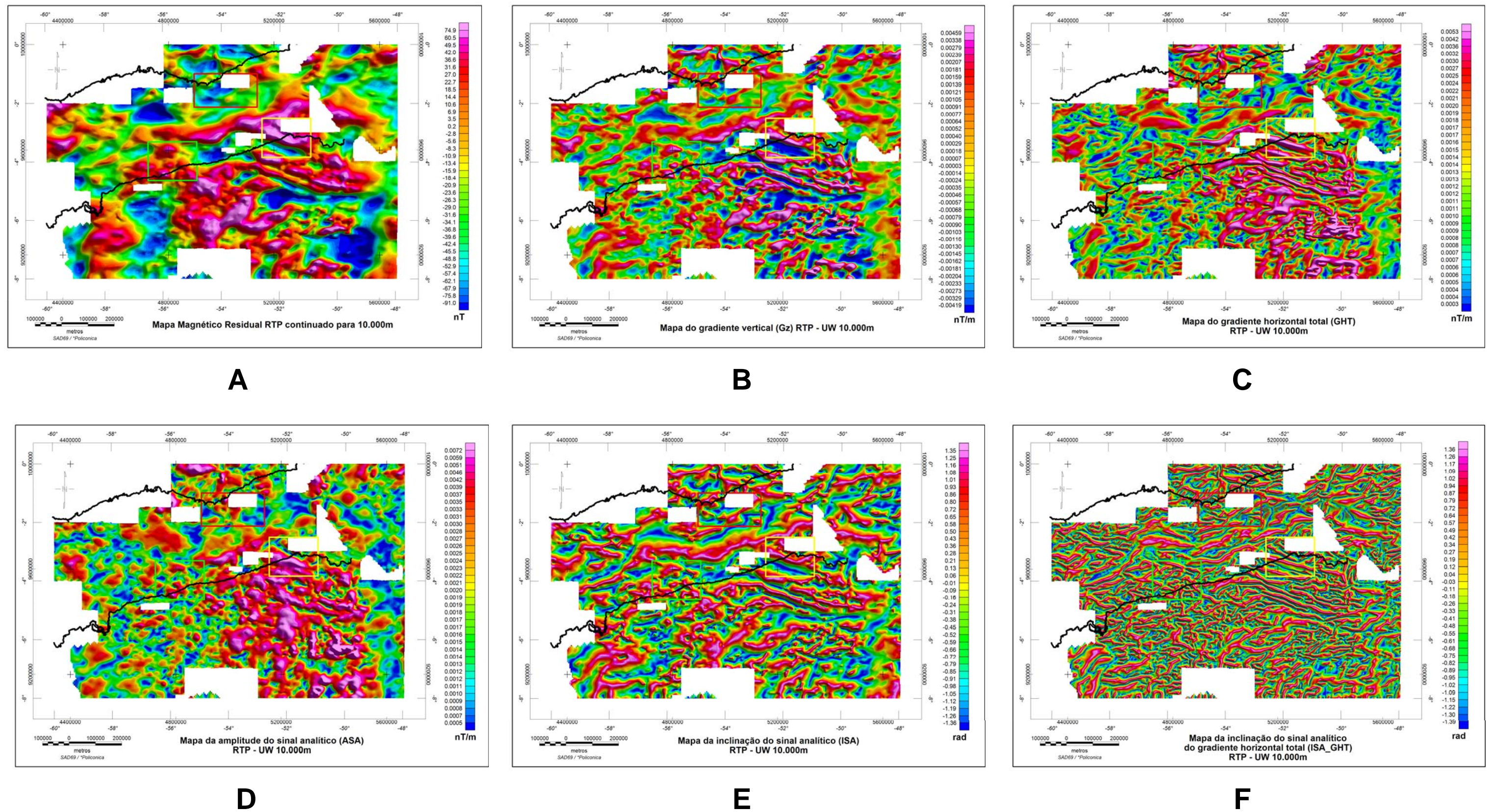


Figura 5.1-11: Mapas magnéticos da área de estudo: (A) mapa residual RTP continuado para **10.000 metros**; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total. Subáreas Tapajós (verde), Xingu (amarelo) e Monte Alegre (vermelho) no contexto da Bacia do Amazonas (limites em preto).

A Figura 5.1-12 mostra o mapa magnético residual RTP, o qual denota correspondência aos principais domínios e feições geológicas da área de estudo, com ênfase nas províncias Carajás/Imataca, Amazônia Central, Tapajós/Parima e Faixa Araguaia (SANTOS *et al.*, 2006), além de exibir com clareza as linhas de charneira e o depocentro da bacia, assim como seu deslocamento pela falha transcorrente Faro-Juruti (WANDERLEY FILHO, 1991) e ainda a Zona de Falha de Urucará (COSTA, 2002). Em geral, notam-se vínculos dos lineamentos do embasamento e as falhas transcorrentes da bacia (e.g. Altamira, Santarém e Faro-Juruti).

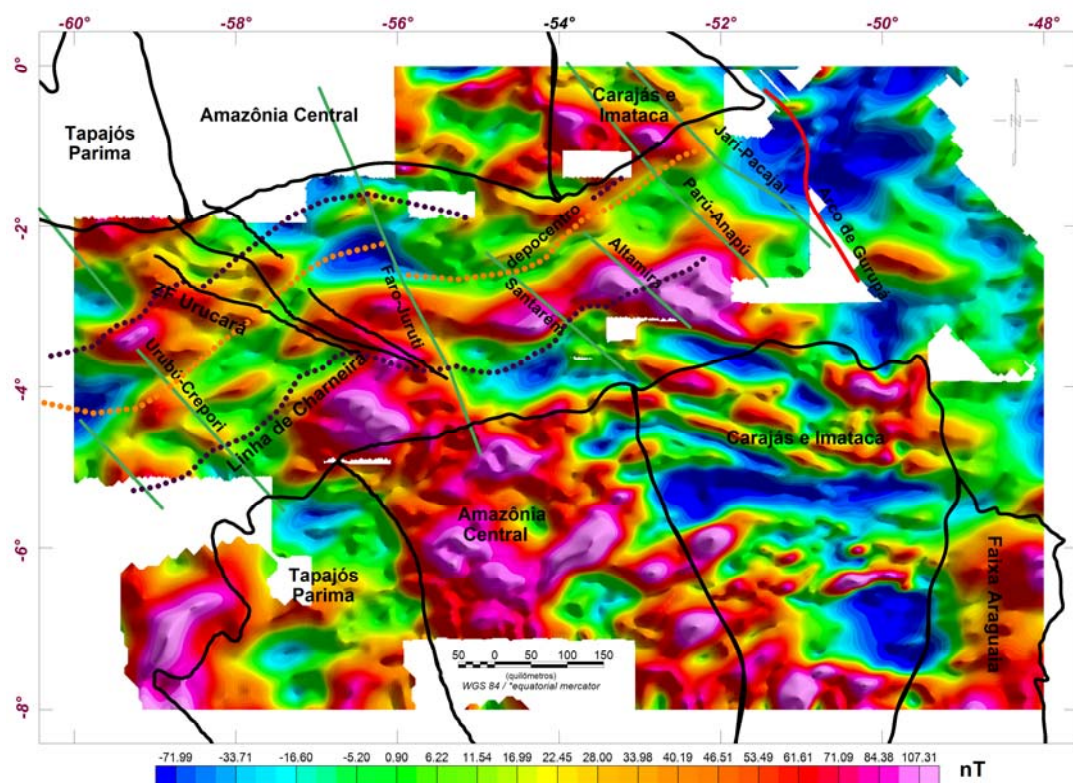


Figura 5.1-12: Mapa magnético residual RTP indicando as principais províncias da área de estudo (SANTOS *et al.*, 2000), o Arco de Gurupá, o eixo deposicional, a linha de charneira da bacia (Wanderley Filho, 1991) e a Zona de Falha Transcorrente de Urucará (COSTA, 2002).

O processamento geofísico e integração com as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas, extraídas de Wanderley Filho (1991), de acordo com a Figura 5.1-3, ensejaram elaborar um mapa preliminar de interpretação magnética qualitativa (Figura 5.1-13). A Figura 5.1-14 mostra o mapa geológico da área de estudo, em correspondência à interpretação magnética qualitativa, indicando as

possíveis continuidades de estruturas geológicas e geofísicas do embasamento exposto na Bacia do Amazonas.

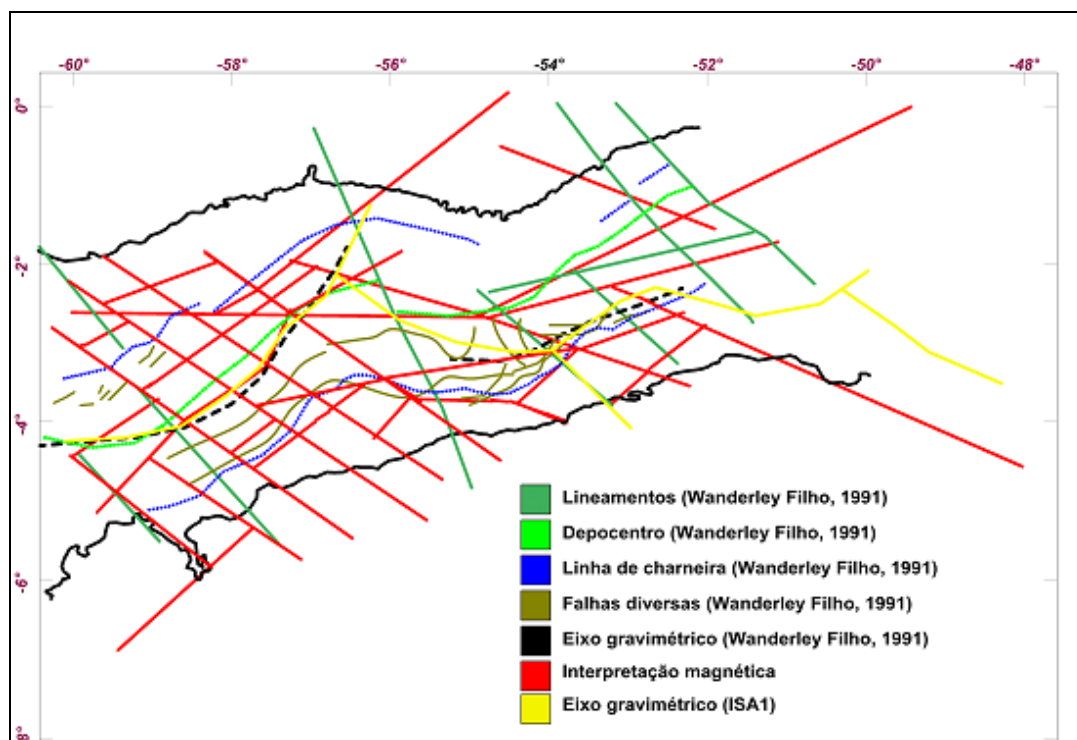


Figura 5.1-13: Mapa de interpretação magnética qualitativa (linhas vermelhas) indicando as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).

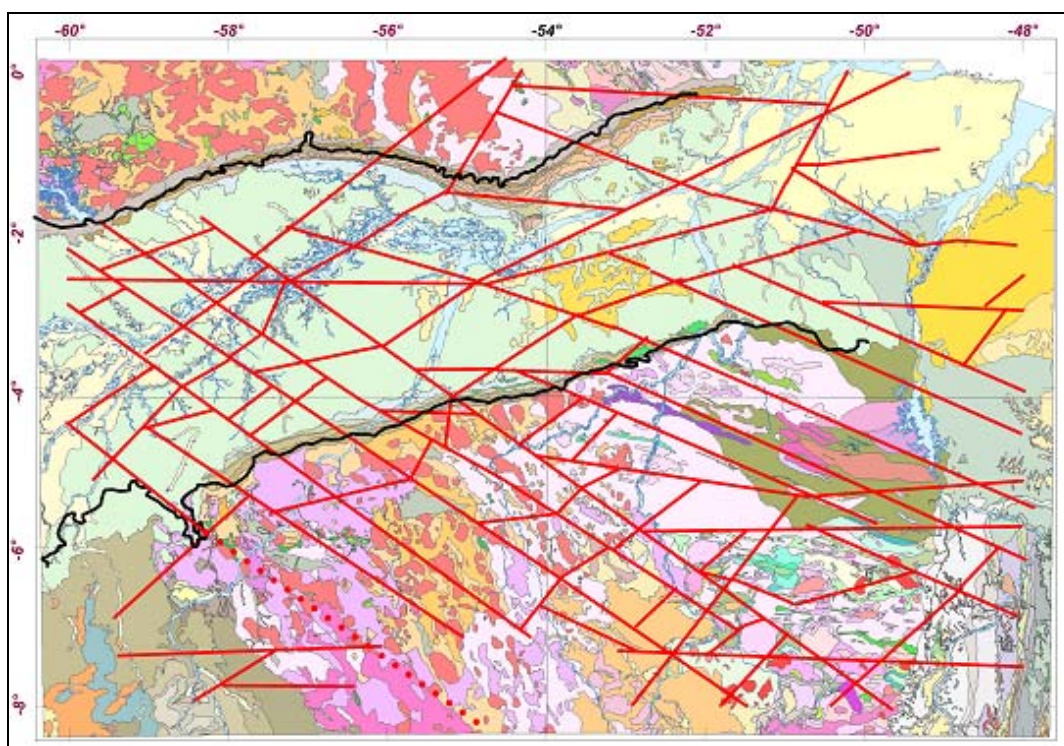


Figura 5.1-14: Mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2004) mostrando a possível continuidade de estruturas magnéticas (sugeridas na Figura 5.1-13) do embasamento exposto na Bacia do Amazonas. A legenda do mapa geológico encontra-se na Figura 4-10.

A análise semi-quantitativa da área utilizou métodos estatísticos de obtenção de profundidades de fontes magnéticas: o método do espectro de potência radial e o método da deconvolução de Euler.

Na Figura 5.1-15 está representado o espectro de potência radial, aplicado no sentido de discriminar fontes anômalas profundas (sinais de baixas frequências espaciais), intermediárias (sinais de frequências espaciais intermediárias) e rasas (sinais de altas frequências espaciais), gerado a partir do mapa magnético residual Figura 5.1-10.

De acordo com a Figura 5.1-15 são discriminadas três partições marcadas pelas mudanças no declive da função espectral, as quais correspondem às profundidades das fontes, que são: profundas com profundidades médias de 12 km; intermediárias com profundidades médias de 8 km e rasas + ruídos, na última partição do espectro, as quais apresentam profundidades médias de 4 km, apesar de estarem relacionadas a profundidades variadas devido aos ruídos.

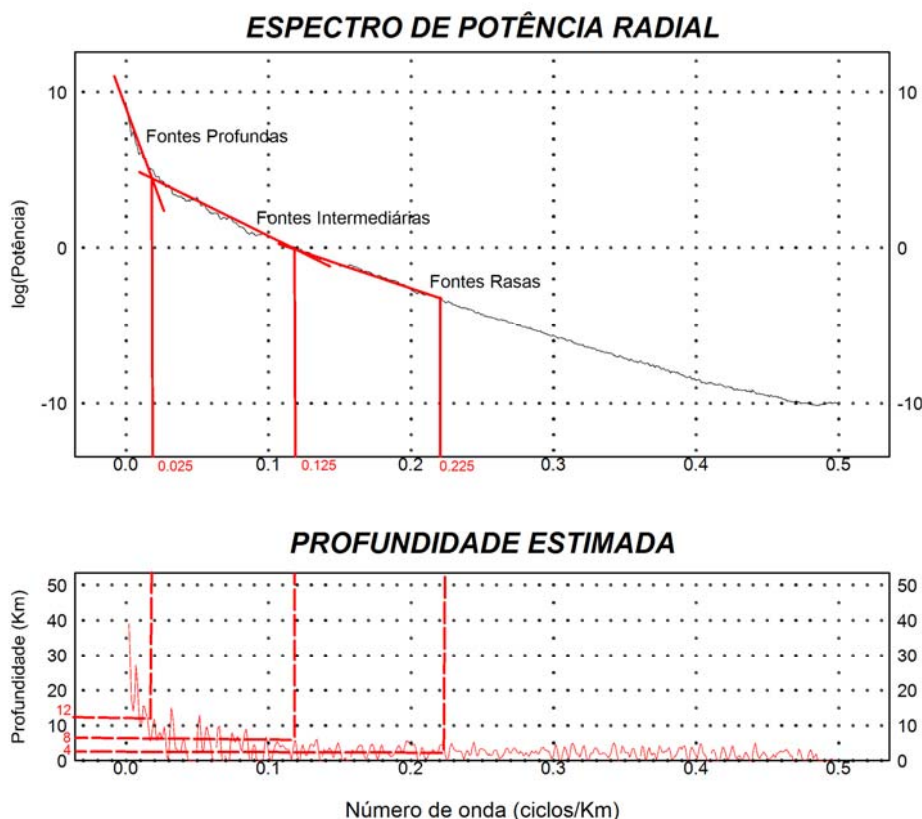


Figura 5.1-15: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual da Figura 5.1-10.

O método de deconvolução de Euler foi aplicado sobre os dados do campo magnético residual da Figura 5.1-10 para os modelos contato e dique, como mostra a Figura 5.1-16 e a Figura 5.1-17. As principais soluções são relacionadas a feições do embasamento exposto.

As profundidades obtidas a partir da análise semi-quantitativa guardam uma relação com o limite bacia/embasamento, principalmente no modelo dique, sugerindo estruturas de muita penetratividade.

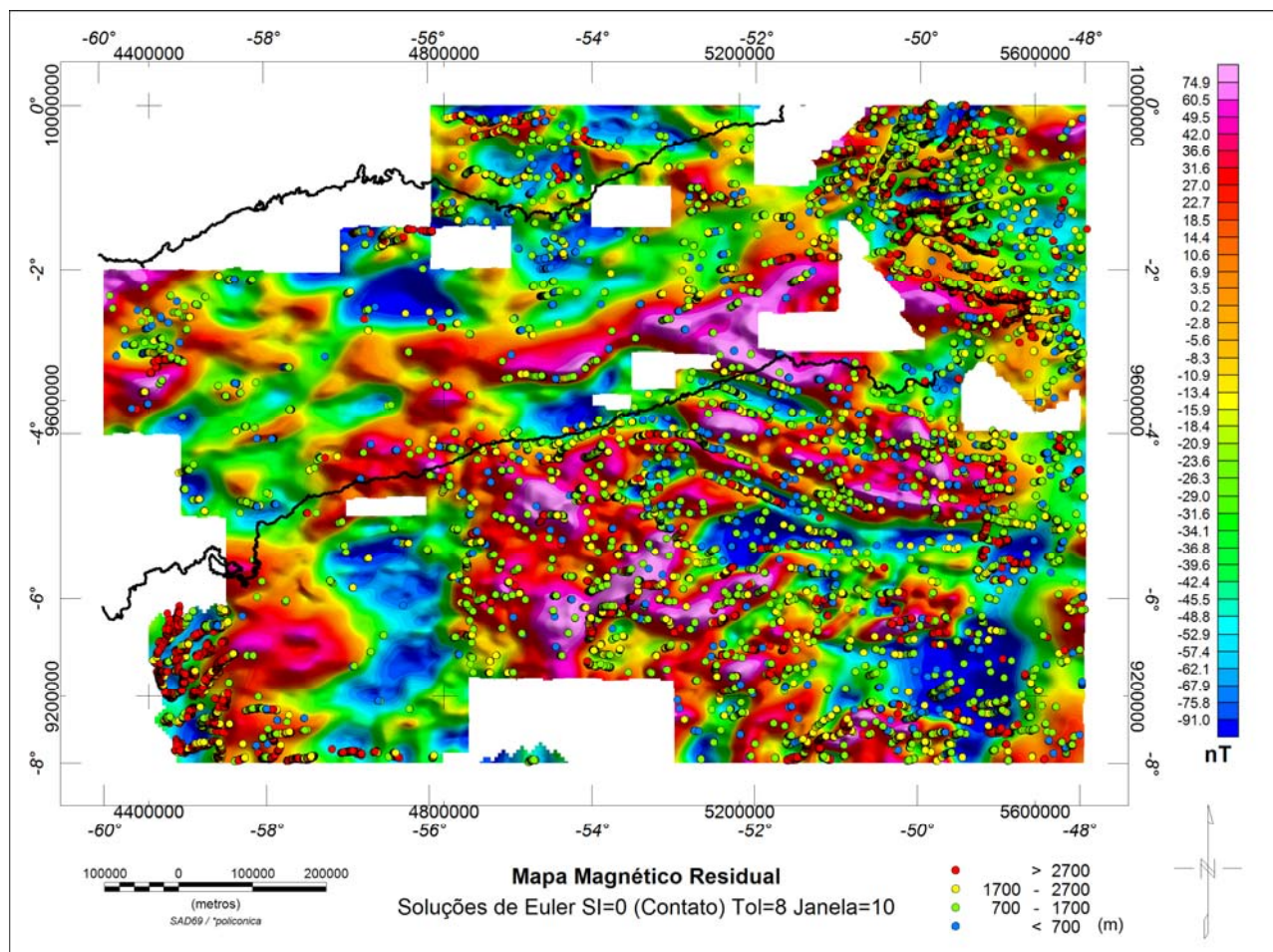


Figura 5.1-16: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo contato.

Finalmente, de mesma forma que na interpretação gravimétrica, cabe salientar que, muitas vezes, a presença de estruturas truncadas pode prejudicar a estimativa de profundidade de fontes.

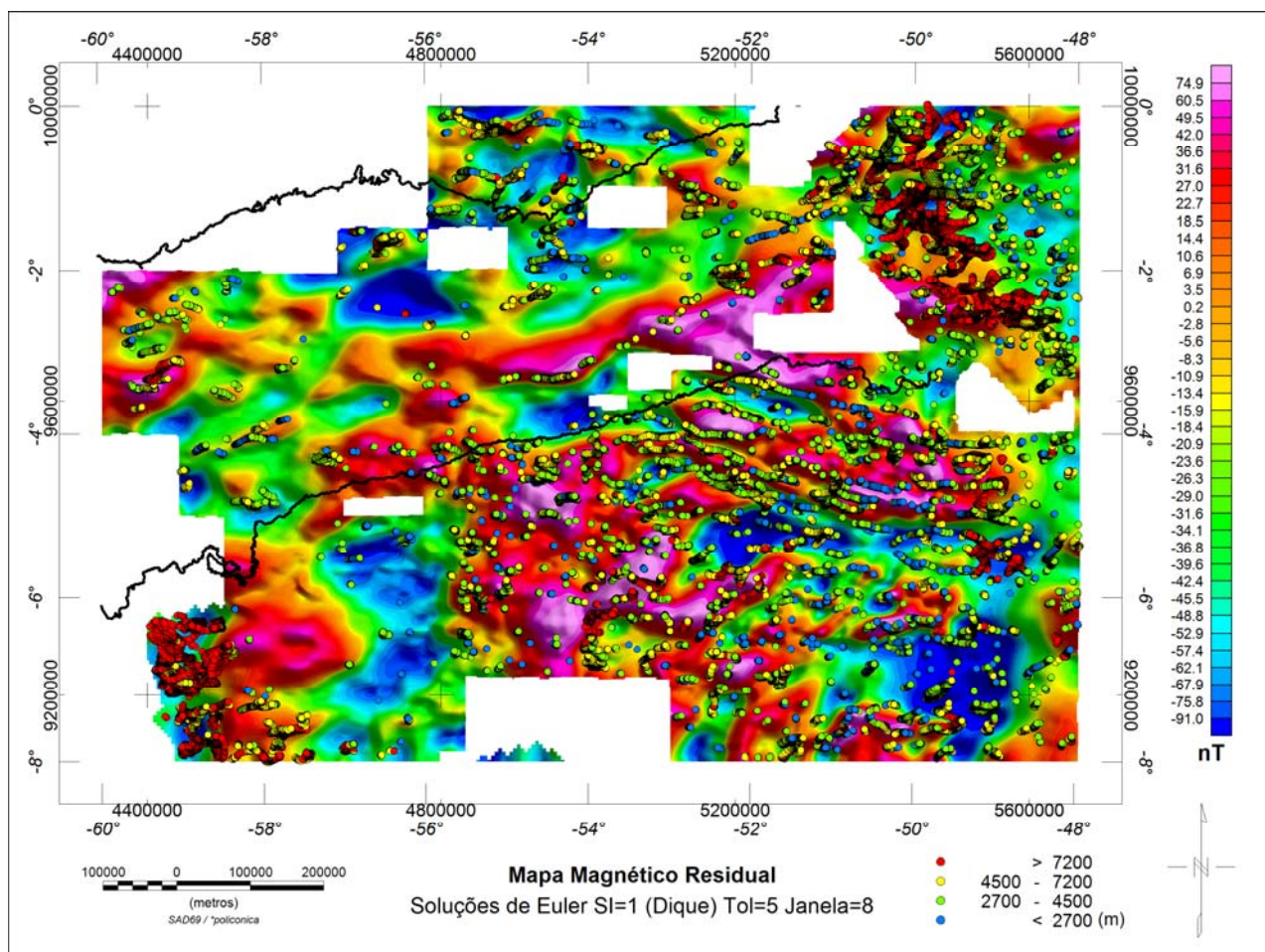


Figura 5.1-17: Mapa das soluções de Euler da área de estudo para o modelo dique.

5.1.3 Integração gravimétrica-magnética

A Figura 5.1-18 e a Figura 5.1-19 apresentam, respectivamente, as sobreposições das interpretações qualitativas gravimétrica (Figura 5.1-4 e Figura 5.1-5) e magnética (Figura 5.1-13 e Figura 5.1-14).

Nota-se nos mapas da Figura 5.1-18 e a Figura 5.1-19 coincidência e/ou paralelismo das tendências gravimétricas e magnéticas com as feições geológicas definidas por Wanderley Filho (1991).

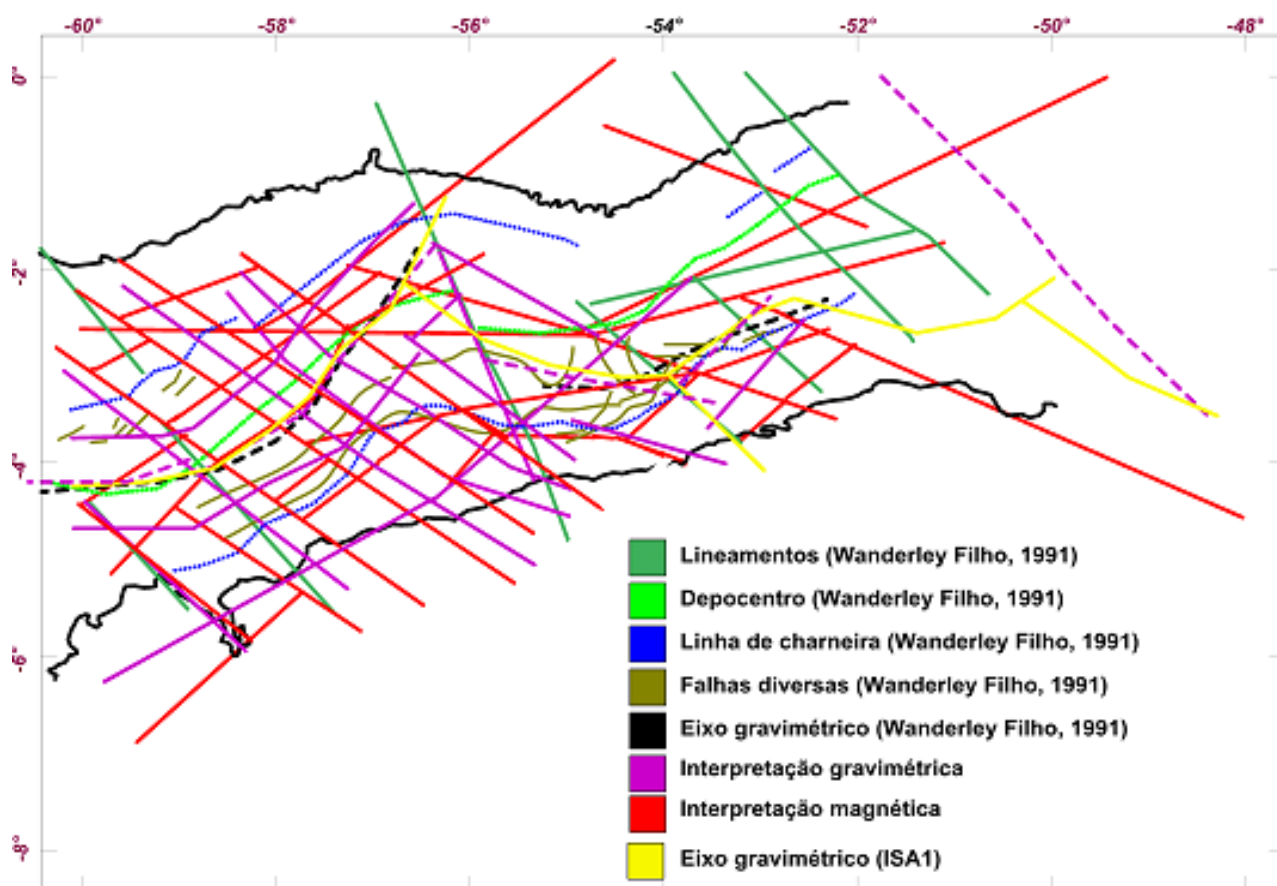


Figura 5.1-18: Mapa de interpretação gravimétrica-magnética qualitativa indicando as principais feições tectônicas da Bacia do Amazonas (WANDERLEY FILHO, 1991).

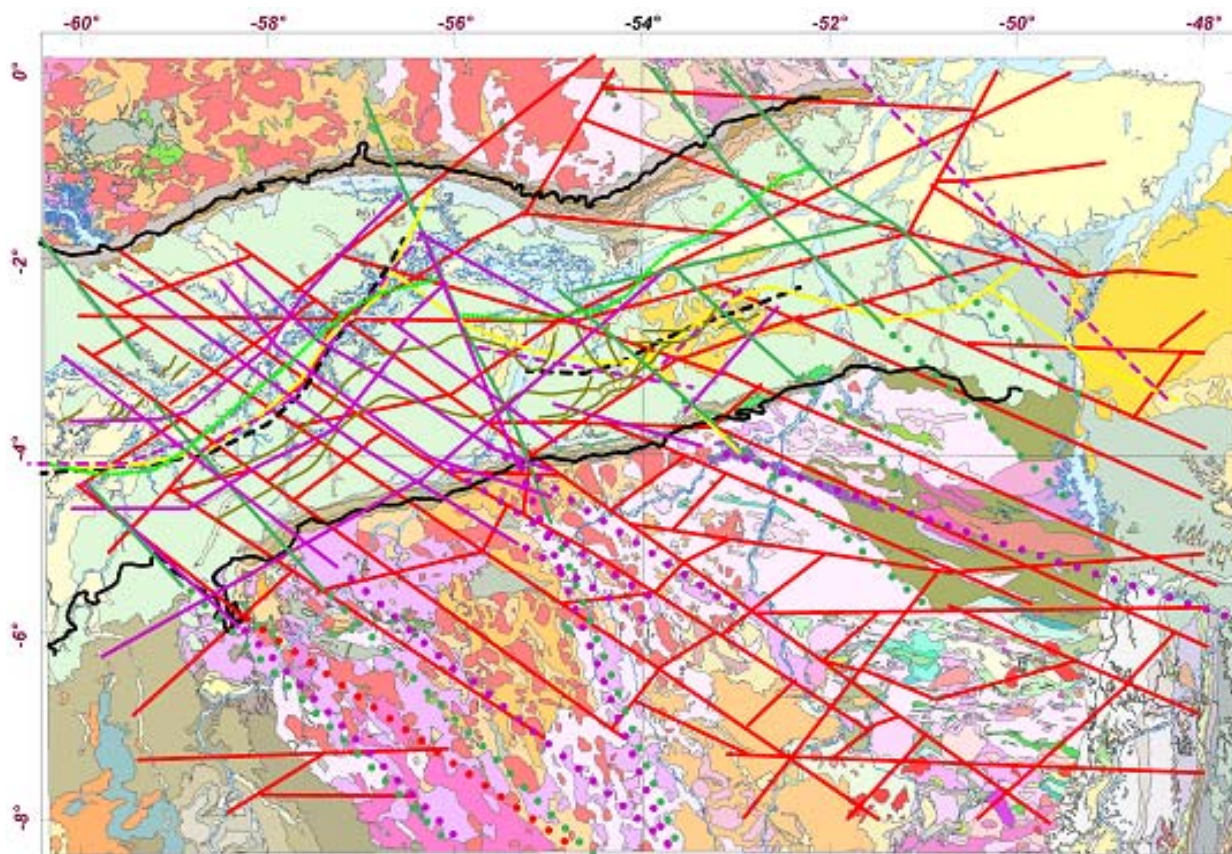


Figura 5.1-19: Mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2004) mostrando a possível continuidade de estruturas gravimétricas e magnéticas (sugeridas na Figura 5.1-4 e na Figura 5.1-13) no embasamento exposto da Bacia do Amazonas. A legenda do mapa geológico encontra-se na Figura 4-10.

5.1.4 Discussão

Conforme discutido em Bongiolo *et al.* (2009), o quadro tectônico do embasamento exhibe feições estruturais dispostas predominantemente segundo NW (e.g. ALMEIDA *et al.*, 1977; CORDANI *et al.*, 1984; HASUI *et al.*, 1984; HASUI, 1990; COSTA *et al.*, 1991a; COSTA, 2002), as quais persistem para o interior da Bacia do Amazonas (e.g. COSTA *et al.*, 1991b; WANDERLEY FILHO, 1991; COSTA, 2002; WANDERLEY FILHO *et al.*, 2006). Por outro lado, estruturas NE, comuns na bacia (e.g. Costa, 2002), não são evidenciadas claramente no embasamento através dos lineamentos geofísicos. Entretanto, por exemplo, na porção Setentrional do escudo, vários lineamentos de direção NE têm sido cartografados como falhas, fraturas ou diques de diabásio (VASQUEZ & ROSA-COSTA, 2008). Grandes lineamentos de

natureza dúctil a dúctil-rúptil, reconhecidos naquela porção Setentrional do embasamento, são representados pelo cinturão de cisalhamento K'mudku, cuja datação Ar-Ar em minerais de rochas miloníticas forneceu a idade de 1,2 Ga (FRAGA, 2002). Este cinturão atravessa o Estado de Roraima, seguindo a direção NE, até atingir a Guiana e o Suriname. Há que se ressaltar o quase paralelismo dos atuais limites da Bacia do Amazonas e a direção do cinturão K'mudku, sugerindo algum controle posterior à instalação da bacia sedimentar. Nas vizinhanças deste cinturão e paralelo a ele, há um conjunto de falhas normais sintéticas que resultaram no hemigráben do Tacutu, de idade mesozóica (COSTA *et al.*, 1991c). Segundo tais autores, as anisotropias estruturais mesoproterozóicas do cinturão de cisalhamento teriam influenciado a implantação do hemigráben. É possível, portanto, que grande parte das falhas e fraturas de direção NE identificadas na área de estudo seja o reflexo de esforços ligados à reativação de estruturas ligadas ao cinturão K'mudku, contemporaneamente ao desenvolvimento do hemigráben do Tacutu. Assim, estruturas rúpteis de direção NE identificadas na Bacia do Amazonas poderiam ter origem relacionada a descontinuidades estruturais herdadas dos domínios do embasamento. Foi possível observar que os lineamentos geofísicos demarcaram as linhas de charneira e zonas de falhas normais e reversas de direção NE-SW da bacia. Também foram geofisicamente reconhecidas descontinuidades NW-SE, comuns ao embasamento e a bacia, relacionadas às principais zonas de falhas transcorrentes. Finalmente, são sugeridos vínculos das tendências NE identificadas na bacia com estruturas do embasamento.

5.2 SUBÁREA TAPAJÓS

5.2.1 Localização

A subárea Tapajós localiza-se na porção Centro-Oeste do Estado do Pará, abrangendo uma área de 27.000 km² nos municípios de Itaituba, São Luiz, Aveiro, Trairão e Rurópolis e limitada pelas coordenadas geográficas 3°20' de latitude Sul e 4°40' e pelas coordenadas 56°30' e 54°50' de longitude Oeste (Figura 5.2-1).

O acesso à área faz-se tanto pela rodovia Transamazônica e BR-163, quanto a partir de Santarém, pelo Rio Tapajós, em percurso de barco com aproximadamente 20 horas até São Luiz.

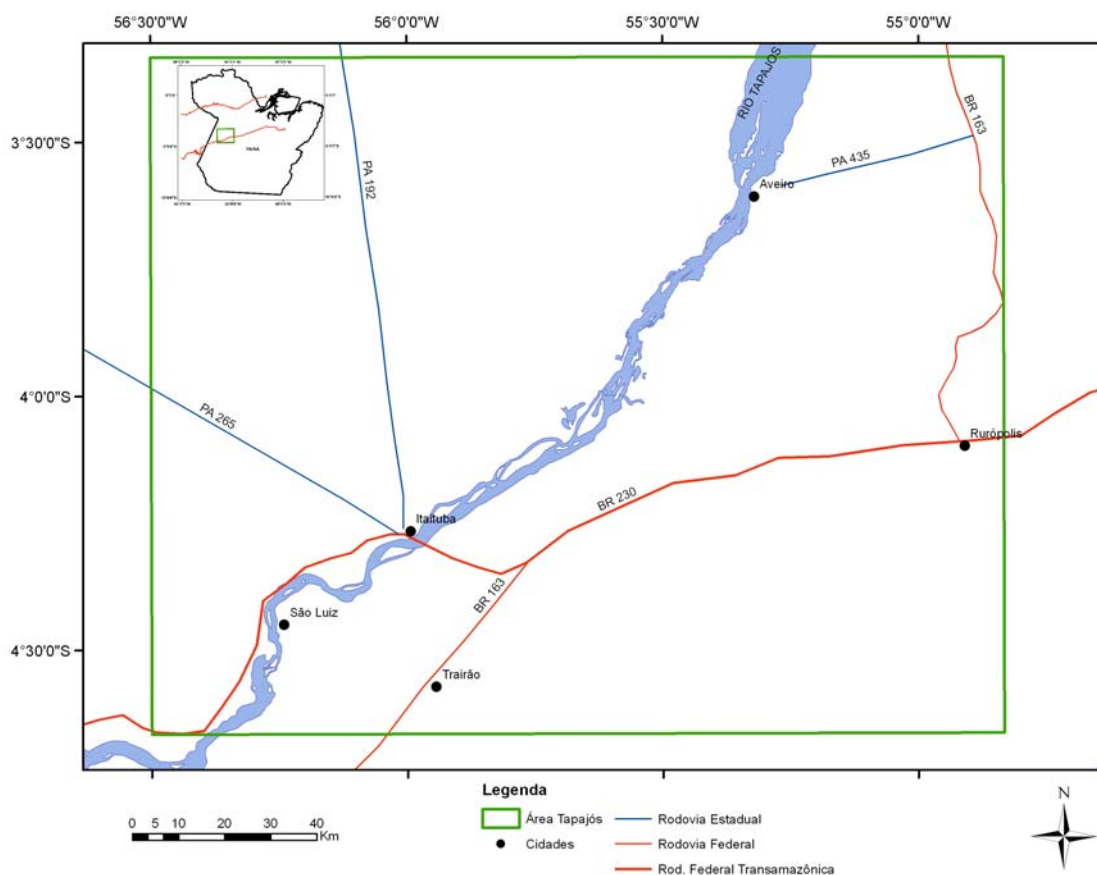


Figura 5.2-1: Localização e acessos da subárea Tapajós.

5.2.2 Material

De acordo com o Capítulo 4, a base dos materiais utilizados foi:

- Mapa geológico da CPRM na escala 1:1.000.000 (Figura 5.2-2);
- Imagens de SRTM com resolução de 90 metros, obtidas no site da USGS (Figura 5.2-3);
- Mapas de traçado de lineamentos em escala 1:800.000 e 1:200.000 de acordo com Santos (2009) (Figura 5.2-4 e Figura 5.2-5);
- Mapa magnético residual CPRM (2002) (Figura 5.2-6).

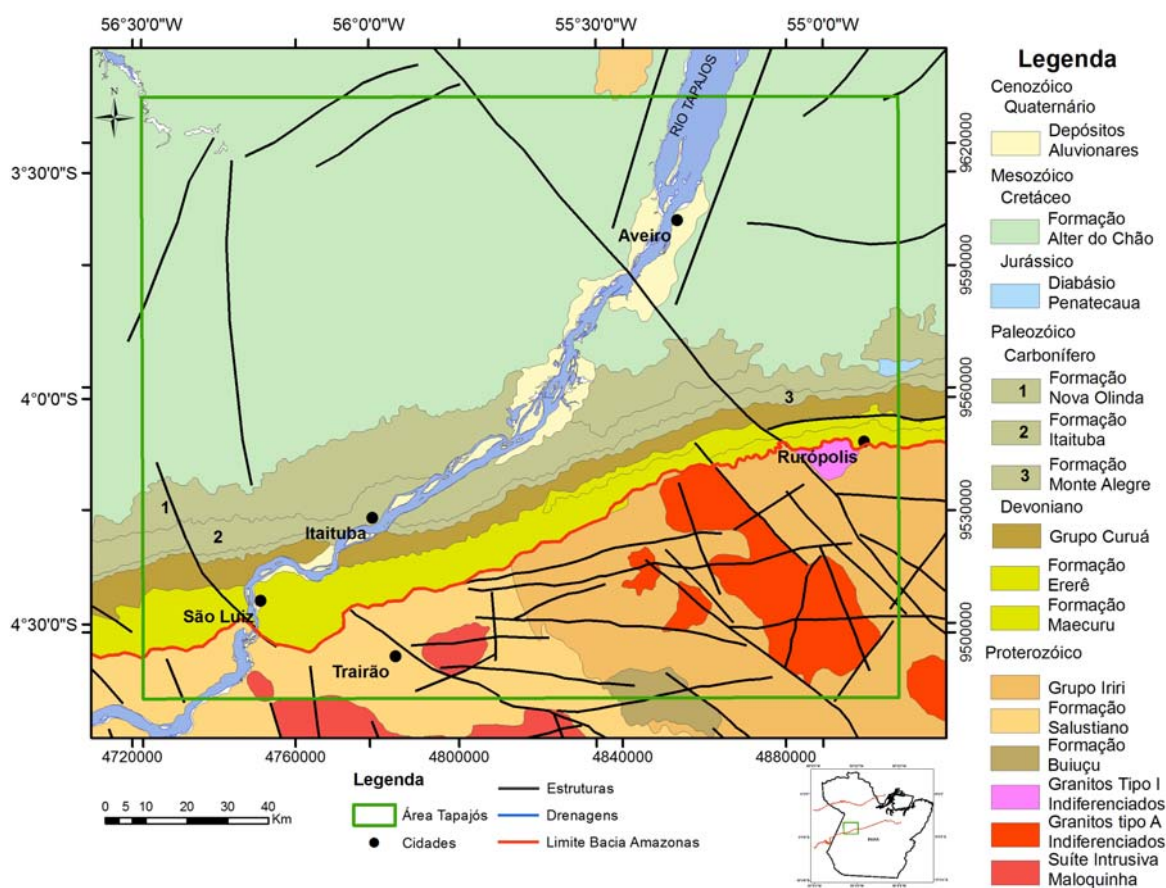


Figura 5.2-2: Mapa geológico da subárea Tapajós (CPRM, 2008).

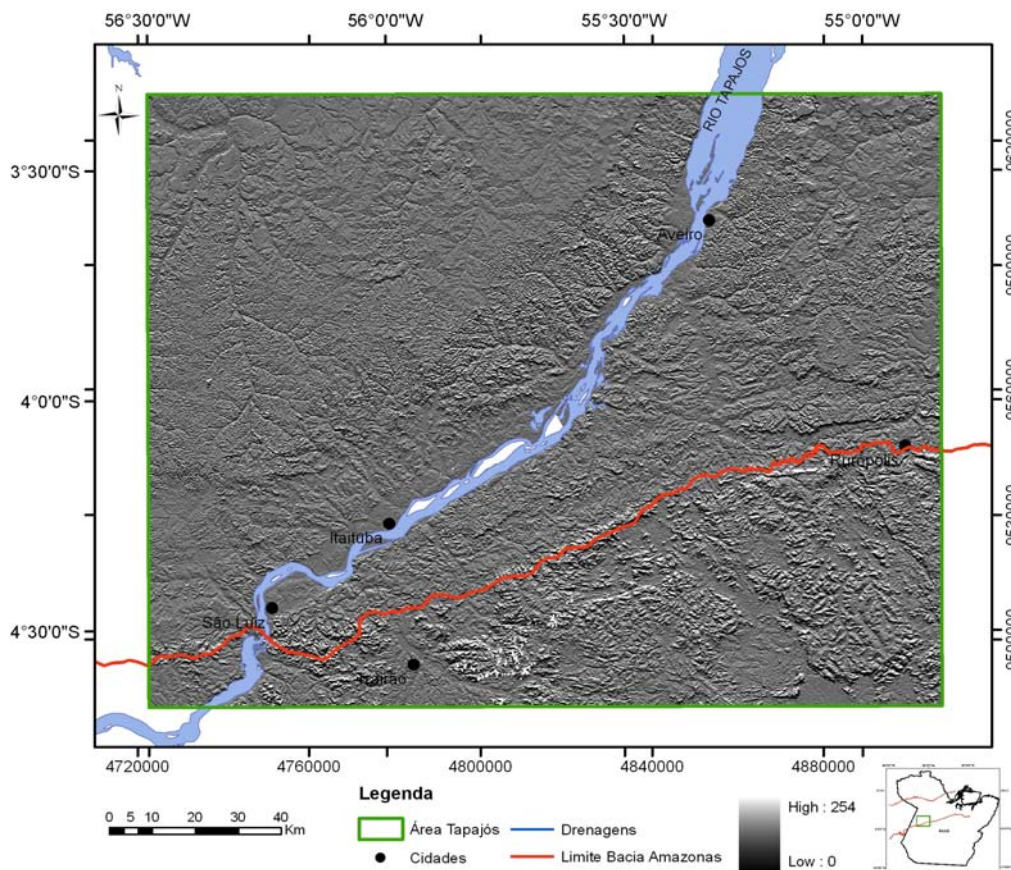


Figura 5.2-3: Imagem SRTM com pseudo-iluminação de 45°.

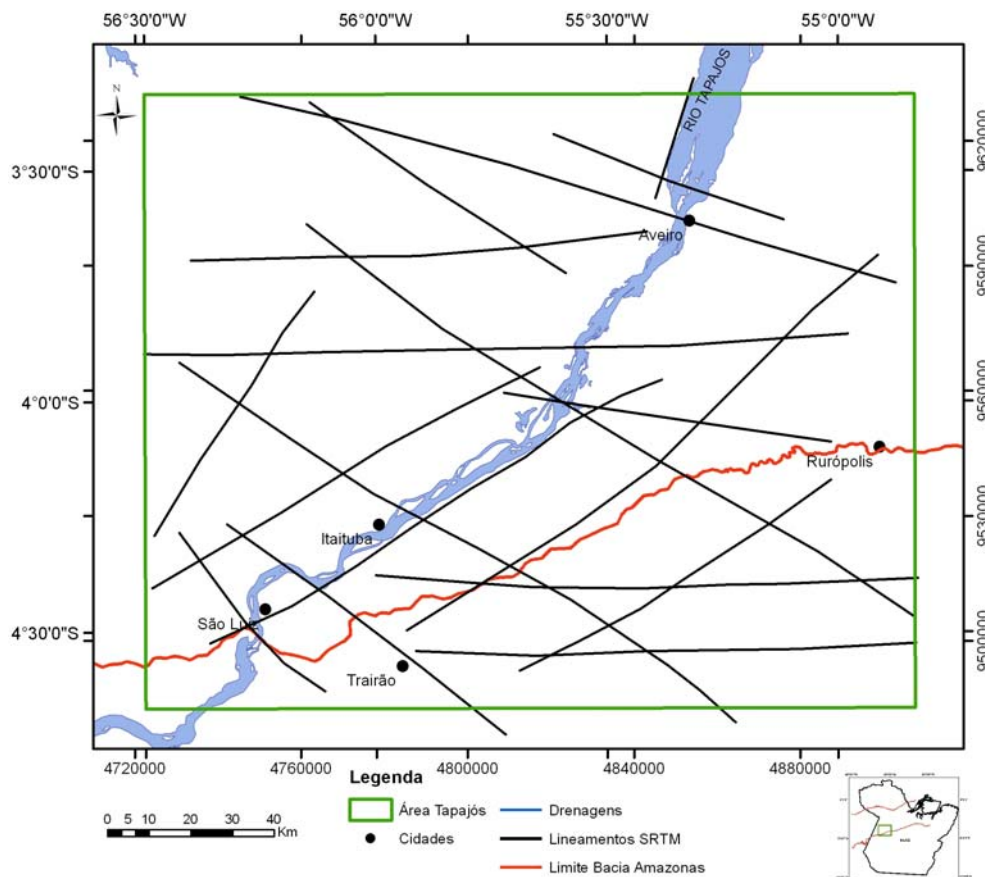


Figura 5.2-4: Lineamentos interpretados em escala 1:800.000. Fonte: Santos (2009).

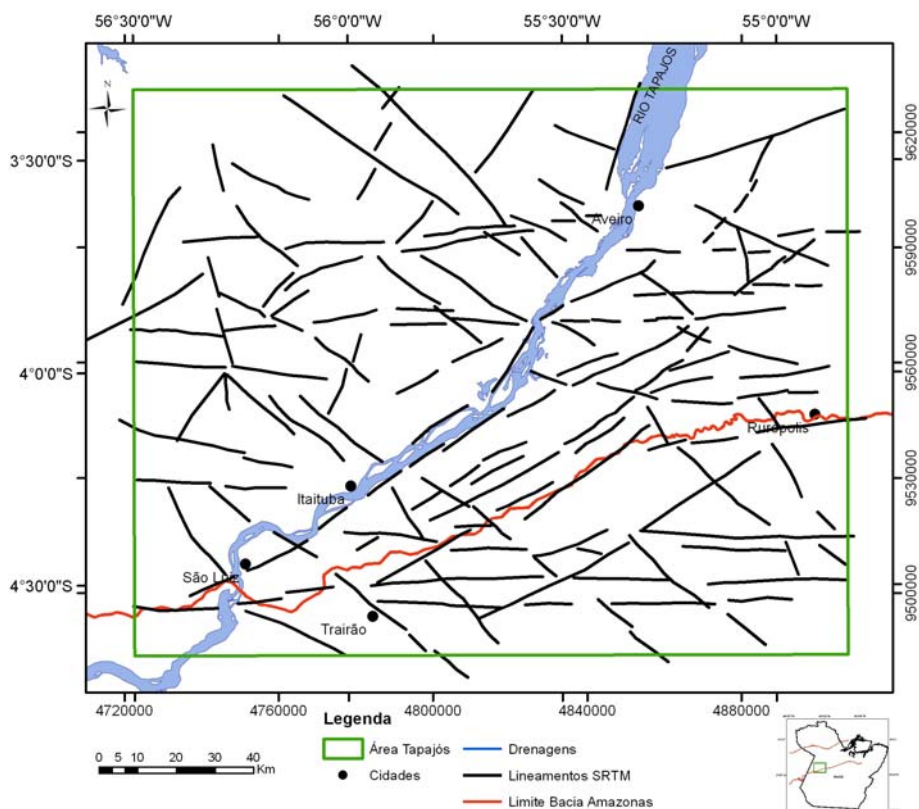


Figura 5.2-5: Lineamentos interpretados em escala 1:200.000. Fonte: Santos (2009).

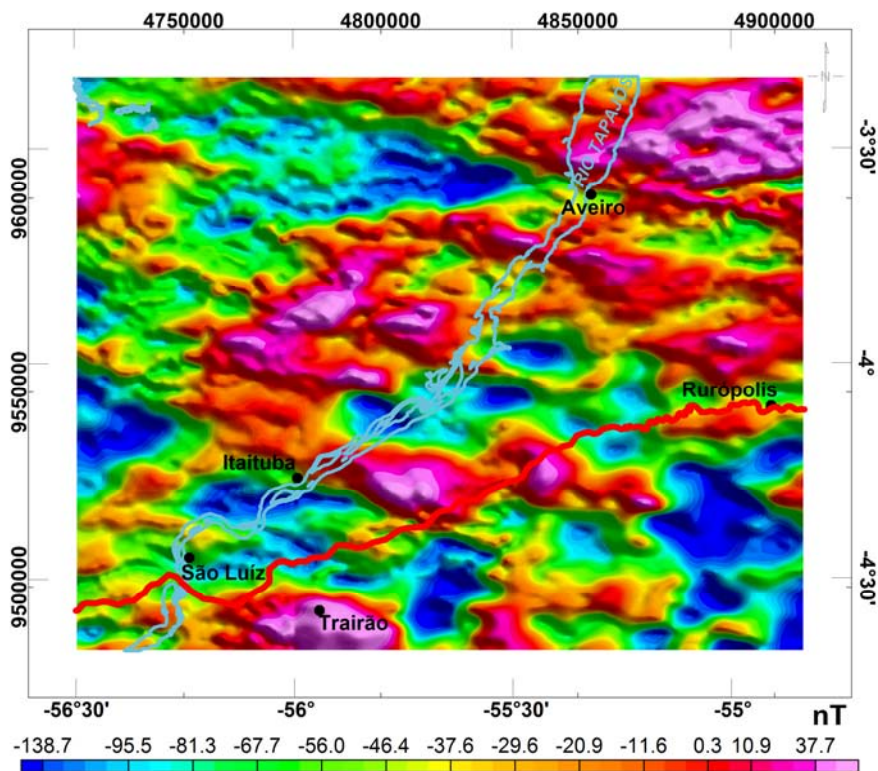


Figura 5.2-6: Mapa magnético residual da subárea Tapajós. Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

5.2.3 Geologia da subárea Tapajós

As unidades litológicas aflorantes correspondem a rochas vulcânicas e vulcanoclásticas do embasamento da Bacia Sedimentar do Amazonas (Grupo Iriri), às seqüências terrígenas das formações Pitinga (Grupo Trombetas), Maecuru e Ererê (Grupo Urupadi), Barreirinha e Curiri (Grupo Curuá), bem como às seqüências siliciclásticas e carbonáticas do Grupo Tapajós, representadas pelas formações Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda, segundo o empilhamento cronoestratigráfico proposto por Cunha *et al.* (1994).

O Grupo Iriri, na área, engloba rochas de composição riolítica, além de vulcanoclásticas, constituídas por brechas piroclásticas e rochas de composição intermediária a básica, como andesitos e tufos, comumente citadas na literatura. Datações geocronológicas mencionadas para essas rochas (RADAM, 1975) fornecem isócronas para a Formação Iriri variando entre 1.645 ± 83 Ma e 1.693 ± 21 Ma. Idade U/Pb (CPRM, 2004) de 1.874 Ma foi obtida para as rochas vulcânicas dessa formação.

A fase inicial de preenchimento da sinéclise alternou sedimentos glaciais e marinhos, com ingressões de Leste para Oeste, em *onlap* sobre o Arco de Purus. Novo ciclo de transgressão e regressão ocorreu na Bacia Sedimentar do Amazonas após a Orogenia Caledoniana, com sedimentação marinha e glacial, cujas rochas foram agrupadas no Grupo Urupadi, subdivididas em formações Maecuru e Ererê. Compreende arenitos e pelitos neríticos e deltaicos (Formação Maecuru), idade Eo-meso-devoniano, além de siltitos, folhelhos e arenitos neríticos e deltaicos Meso-devonianos da Formação Ererê (CUNHA *et al.*, 1994).

Deposição de espessa seção sedimentar deu-se na bacia após pequeno pulso regressivo, cujo registro está representado por rochas do Grupo Curuá, que na área Tapajós constitui as formações Barreirinha e Curiri. A primeira é composta por folhelho cinza escuro a preto depositado durante a transgressão global no

Devoniano Superior; diamictitos, folhelhos e siltitos marinhos constituem a Formação Curiri (CUNHA *et al.*, 1994).

Mudanças climáticas significativas de frio para quente e árido entre o Neocarbonífero e o Neopermiano atingiram a bacia, ocasionando a formação de ciclo deposicional transgressivo-regressivo, representado pelas rochas do Grupo Tapajós. O ciclo teve início com deposição de arenitos eólicos com estratificação cruzada, intercalados por siltitos e folhelhos de lagos e interdunas agrupados na Formação Monte Alegre. Em direção ao topo, em contato gradacional, depositaram-se calcários de inframaré e evaporitos de planície de Sabkha das formações Itaituba e Nova Olinda (CUNHA *et al.*, 1994). Como consequência do tamanho da bacia, da sua conexão estreita com o mar e da pequena amplitude das marés, a sedimentação carbonática é representada por um número restrito de tipos texturais característicos de baixa energia como calcarenitos com matriz bioclástica ou calcissiltítica, biocalcissiltitos e micritos (CAROZZI *et al.*, 1973).

No topo da Formação Nova Olinda foi identificada, com base em evidências de microfauna de fusulinídeos e conodontes e em sessão sísmica, discordância com aproximadamente 21 Ma, marcada pela presença de conglomerados com indícios de exposição subaérea, além de halita com bandas anidriticas e calcíferas, anidrita nodular com matriz argilosa (*chicken wire*) e folhelhos castanho-avermelhados intercalados com conglomerados intraformacionais (MATSUDA *et al.*, 2004).

A seção paleozóica da bacia se encerra com a deposição dos sedimentos da Formação Andirá, representados por rochas siliciclásticas avermelhadas, raros evaporitos e carbonatos depositados em ambiente fluvial/lacustrino a marinho restrito.

Na fase de sinéclise da bacia, Cunha *et al.* (1994) reconhecem seqüências sedimentares transgressivas/regressivas, correspondendo a ciclos de segunda ordem, delimitados por discordâncias relacionadas a episódios orogênicos:

i) Sequência Ordoviciano-Devoniana: reúne os clásticos marinhos do Grupo Trombetas e está parcialmente truncada pela discordância decorrente da Orogenia Caledoniana;

ii) Sequência Devoniana-Carbonífera: clásticos flúvio-deltáicos e neríticos dos grupos Urupadi e Curuá e tem seu topo marcado pela discordância relacionada à Orogenia Eo-herciniana;

iii) Sequência Permo-Carbonífera: clásticos, carbonatos e evaporitos continentais e de ambiente marinho restrito ao Grupo Tapajós, cortada pela discordância resultante da Orogenia Gondwanide e do diastrofismo Juruá;

iv) Sequência Cretácea-Terciária: clásticos flúvio-lacustres do Grupo Javari, ocupou os espaços criados pela atividade da Orogenia Andina.

5.2.4 Geologia estrutural da Bacia do Amazonas e do seu embasamento na subárea Tapajós

Rezende & Brito (1973), com base em interpretações de imagens de radar, geofísicas e informações de campo, observaram lineamentos/falhas de direção NW bem marcados, os quais correspondem a falhas transcorrentes com cinemática dextral (Figura 5.2-7).

Wanderley Filho (1991) denominou os lineamentos NW de falhas de transferência, as quais deslocam o eixo do depocentro da Bacia do Amazonas e o eixo da linha de charneira que corresponde ao gradiente das anomalias gravimétricas (Figura 5.2-8). Um sistema de falhas transcorrentes que atravessa a bacia e a porção Norte da área estudada, com direção NW, foi denominado por Costa (2002) de Sistema de Falhas Transcorrentes de Urucará e pode corresponder a zonas de cisalhamento do embasamento. Segundo o mesmo autor, esse sistema desloca o eixo gravimétrico da bacia, sugerindo movimentação sinistral (Figura 5.2-8). A Figura 5.2-9 apresenta as estruturas mapeadas para a bacia e para o embasamento no mapa geológico do Estado do Pará (CPRM, 2008), sem

discriminar as tendências quanto à cinemática ou padrão regional da área. É evidente a heterogeneidade da informação estrutural na Bacia do Amazonas, provavelmente em decorrência de projetos de mapeamentos realizados em épocas distintas e com diferentes graus de detalhamento.

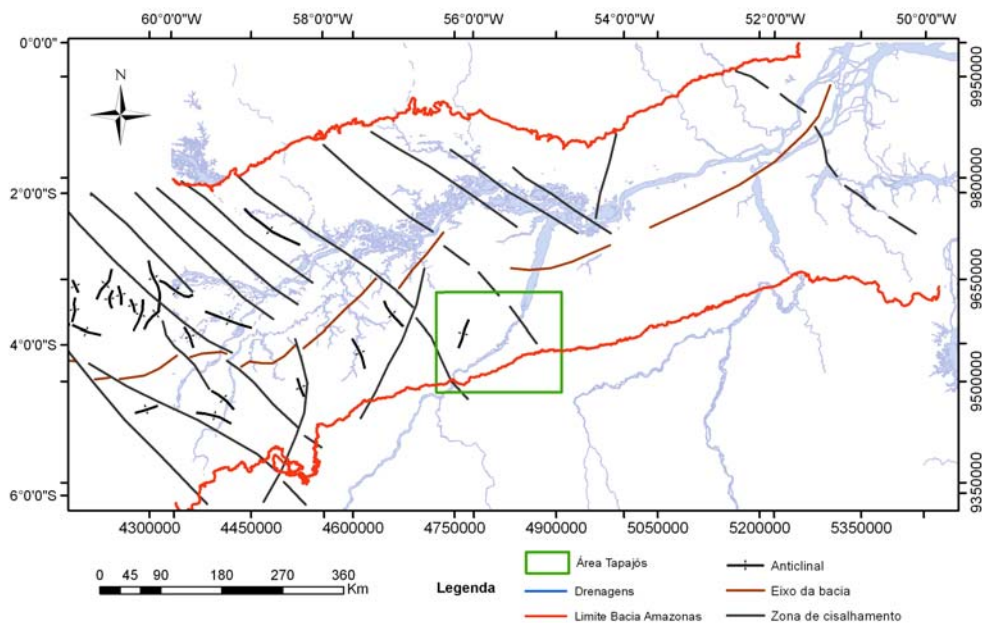


Figura 5.2-7: Mapa da Bacia do Amazonas com destaque para a subárea de estudo em verde e as estruturas de tectônica de cisalhamento e associadas. Modificado de Rezende & Brito (1973).

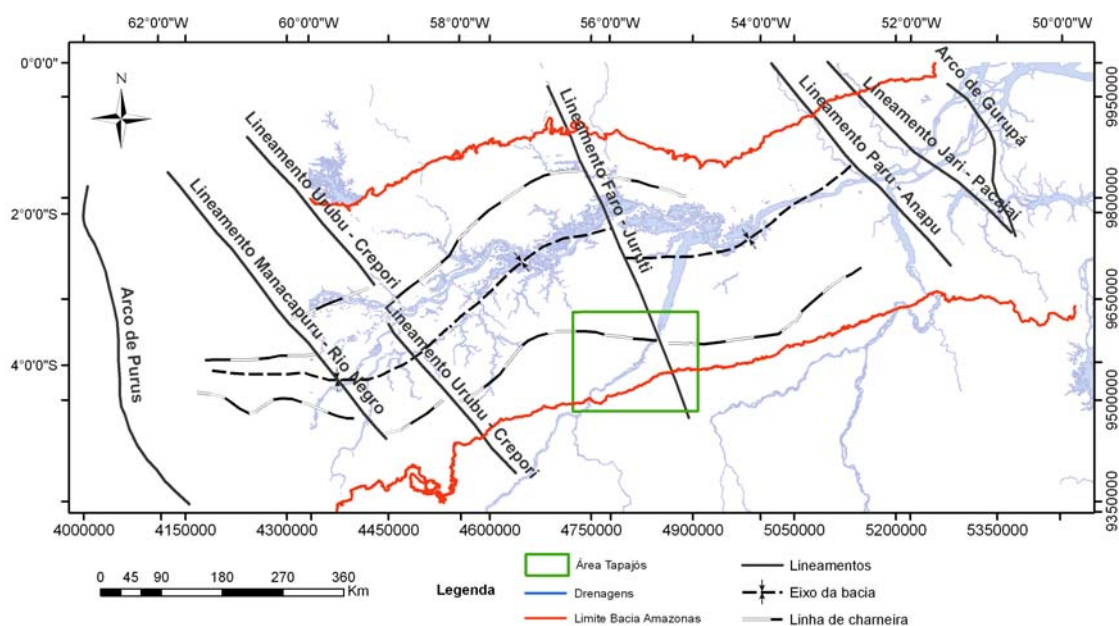


Figura 5.2-8: Lineamentos de direção NW interpretados por Wanderley Filho (1991) como falhas de transferência as quais deslocam do eixo da bacia e da linha de charneira. Destaque para a subárea de estudo em verde.

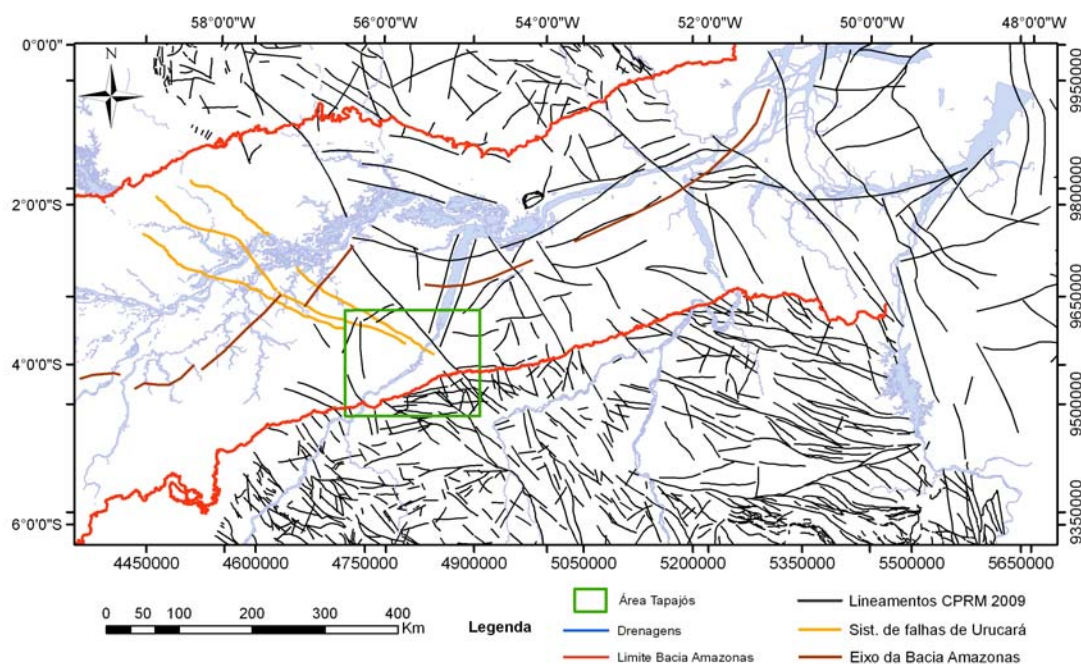


Figura 5.2-9: Mapa estrutural do Estado do Pará (CPRM, 2008) e sistema de falhas transcorrentes de Urucará (Costa, 2002). Destaque para a subárea em verde.

5.2.5 Análise de lineamentos

As imagens SRTM (Figura 5.2-3), com resolução de 90 metros, pseudo-iluminadas segundo 0° , 45° , 90° e 315° , foram utilizadas por Santos (2009) para delinear lineamentos estruturais e morfoestruturas, durante o decorrer do Projeto CATEA.

As principais tendências observadas correspondem a feições retilíneas, negativas e positivas, representadas por lineamentos com comprimentos de dezenas a centenas de quilômetros. Os lineamentos foram traçados em escala regional (1:800.000), designados de primeira ordem, contínuos e com mais de 10 km de extensão, visando identificar as principais estruturas. Os lineamentos também foram interpretados na escala 1:200.000.

A partir dos lineamentos traçados por Santos (2009), foram confeccionados, nesta tese, diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados, utilizando o *software RockWorks*. As direções preferenciais dos lineamentos são

N50-60W e E-W, com maiores comprimentos e frequências. A direção N50-60E aparece de forma secundária, como mostra a Figura 5.2-10.

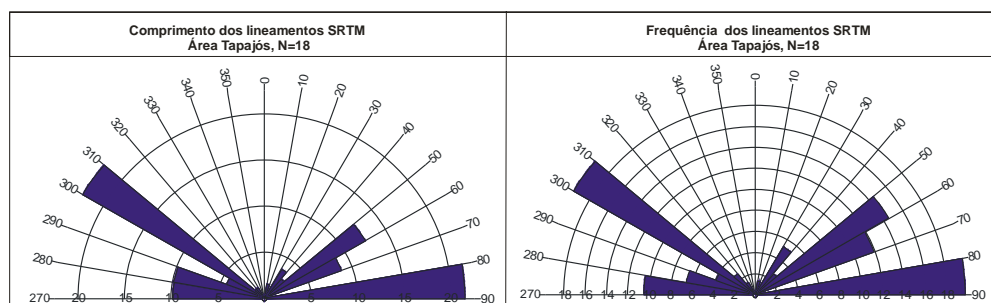


Figura 5.2-10: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos estruturais da subárea na escala 1:800.000.

O mapa do arcabouço estrutural da subárea obtido por Santos (2009) a partir da análise de lineamentos interpretados em imagens de sensores remotos associados a dados de campo (Figura 5.2-4 e Figura 5.2-5), contém lineamentos que sugerem a presença de falhas importantes. Nestes mapas se observou que as direções NE e NW seguem as grandes estruturas propostas por diversos autores para a bacia e para o embasamento, compartimentando blocos estruturais e afetando rochas do embasamento e da bacia. Convém salientar a presença de falhas direção E-W, as quais apresentam-se dispersas por toda a subárea, com razoável continuidade, bem marcadas na seção mesozóica-cenozóica e no embasamento (SANTOS, 2009).

Santos (2009), ao realizar análise estrutural sobre as rochas do embasamento e da Bacia do Amazonas, aflorantes na região de Itaituba-PA, com a caracterização das estruturas e as respectivas cinemáticas e paleotensões, baseada em estudos regionais de deformações, dados de campo e imagens orbitais, concluiu que o arcabouço estrutural da subárea Tapajós é definido por três direções preferências de lineamentos: N50-70W, N60-70E e E-W. Os dois primeiros *trends* são reconhecidos na magnetometria e podem representar estruturas mais antigas ou profundas, e são correlacionáveis a estruturas descritas na literatura para o

embasamento. Os lineamentos E-W reconhecidos principalmente nas imagens SRTM podem refletir estruturas geradas em eventos mais recentes.

5.2.6 Arcabouço geofísico

5.2.6.1 Interpretação qualitativa

A análise do arcabouço geofísico da subárea Tapajós foi apoiada na série de aerolevantamentos do Brasil ao Milionésimo, elaborado pela CPRM (2002), cujos dados digitais são apresentados na forma de malha regular de 1.000x1.000 metros e continuados para uma altura média de vôo de 1.000 metros (Figura 5.2-6). Para o processamento e interpretação qualitativa dos dados magnéticos e aplicação da técnica de RTP (redução ao polo) da subárea de estudo, fez-se uso do *software* Oasis Montaj 6.3 da Geosoft™.

Neste tópico são apresentados os mapas magnéticos da subárea reduzidos ao polo e derivados dos métodos de realce de anomalias descritos nos capítulos 2 e 3, os quais ensejaram elaborar um mapa preliminar de interpretação magnética qualitativa. Todos os mapas foram pseudo-iluminados na direção N45E, com a finalidade de melhorar a apresentação e realçar as estruturas de interesse.

A análise do mapa magnético residual RTP (Figura 5.2-11), apesar de indicar as principais tendências da subárea, exhibe sinais de alta frequência espacial, reflexo de fontes rasas, os quais podem se transformar em ruídos, como resultado da aplicação dos métodos de realce apresentados a seguir.

Para minimizar este problema, inicialmente os dados do mapa magnético residual RTP foram submetidos a continuações ascendentes, para simular os resultados decorrentes nas altitudes de 2.000 e 5.000m, os quais são exibidos na Figura 5.2-12, onde se notou a eliminação de grande parte dos sinais de alta frequência espacial do mapa residual original (1.000m de altura), realçando as fontes anômalas profundas (maiores comprimentos de onda).

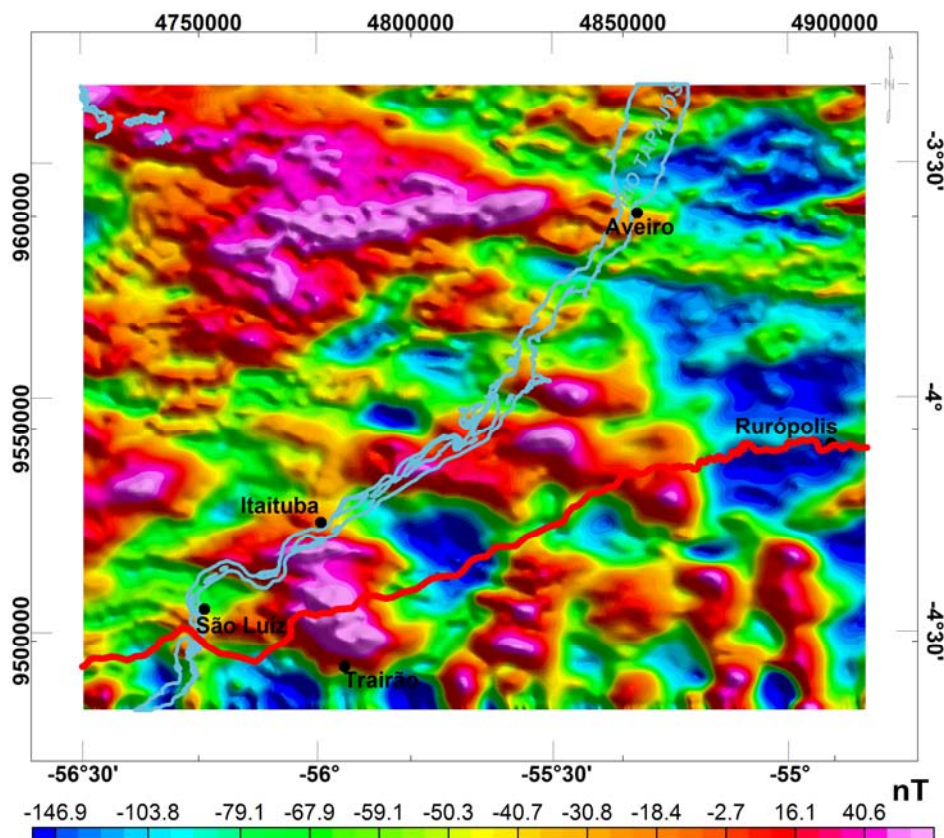


Figura 5.2-11: Mapa magnético residual da subárea Tapajós reduzido ao polo (RTP). Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

No bloco diagrama nota-se, a partir da superfície (SRTM), a suavização progressiva das estruturas quando se aumenta a profundidade, permanecendo no mapa continuado a 5.000m estruturas profundas, objeto deste estudo, de direção NE e NW, principalmente na porção central da subárea, e E-W na porção Centro-Sul, em coincidência a estruturas observadas no arcabouço estrutural de superfície proposto por Santos (2009).

A interpretação magnética qualitativa envolveu a interpretação dos principais lineamentos geofísicos sobre os diversos mapas magnéticos derivados dos filtros de realce de anomalias descritos no Capítulo 2, visualizados nos mosaicos da Figura 5.2-13 e Figura 5.2-14 (mapas gerados a partir do campo continuado para 2.000 metros) e nos mosaicos da Figura 5.2-15 e Figura 5.2-16 (mapas gerados a partir do campo continuado para 5.000 metros).

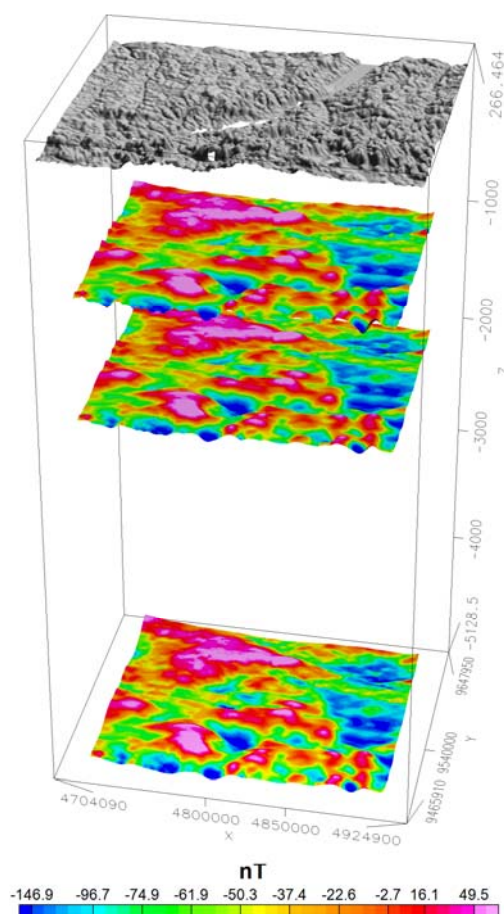


Figura 5.2-12: Bloco diagrama da subárea Tapajós com mapa SRTM, mapa magnético residual RTP (1.000 metros), mapas continuados a 2.000 e 5.000 metros.

Julgou-se conveniente aplicar os filtros de realce sobre os campos continuados a 2.000 metros e 5.000 metros, reduzidos ao polo, no intuito de realçar fontes intermediárias a profundas, como também, de anular e/ou atenuar a influência fontes rasas e de ruídos.

A resposta apresentada para cada filtro, nos diferentes campos continuados, foi analisada separadamente, de acordo com os atributos de cada método de realce, do que decorreu a interpretação dos lineamentos geofísicos.

Os mapas magnéticos residuais e transformados, continuados tanto para 2.000m quanto para 5.000m, Figura 5.2-13A e Figura 5.2-15A respectivamente, mostram a preservação de um *trend* de direção NW que atravessa toda a subárea, além de estruturas NE que parecem desaparecer conforme aumenta o grau de continuação. Observou-se que os filtros aplicados sobre os dados continuados para

5.000m apresentam maior clareza de estruturas de maior penetratividade, realçando as feições de maior profundidade.

O gradiente vertical (Gz - Figura 5.2-13B e Figura 5.2-15B) realçou as estruturas NW no contexto da bacia e apresenta anomalias de formas aparentemente circulares que podem refletir rochas do embasamento.

A resposta do filtro da amplitude do sinal analítico (ASA-Figura 5.2-13D e Figura 5.2-15D) exibe lineamentos de direção preferencial NW-SE e WNW-ESE, no contexto do embasamento, os quais adentram a bacia, além de estruturas NE-SW na Bacia do Amazonas, representados por anomalias em formato de sino, características deste método. O gradiente horizontal total (GHT-Figura 5.2-13C e Figura 5.2-15C) ressalta anomalias representativas das bordas dos grandes lineamentos exibidos no filtro da amplitude do sinal analítico.

O filtro de inclinação do sinal analítico de 1ª e 2ª ordem, Figura 5.2-13E,F e Figura 5.2-15E,F; foi útil no delineamento de estruturas geofísicas. Foi possível verificar a consistência de certas feições por comparação com os mapas de fontes profundas. Observou-se a presença maior de estruturas NE no contexto da Bacia, estruturas NW-SE e WNW-ESE no contexto do embasamento adentrando a bacia, bem como algumas estruturas E-W, as quais ainda não haviam sido bem ressaltadas nos demais mapas.

Os filtros de 2ª ordem, GHT_ISA e ISA_GHT, Figura 5.2-14I,J e Figura 5.2-16I,J; auxiliaram no refinamento das feições e estruturas magnéticas de direções NW, NE e E-W, com respostas satisfatórias, principalmente por não serem demasiadamente influenciados pelas latitudes magnéticas da subárea investigada. A técnica ISA_GHT evidenciou com maior clareza tendências NW-SE e NE-SW, facilitando a interpretação qualitativa.

Notam-se, em alguns mapas, tendências de direção NS, relativas a ruídos gerados pela aplicação do filtro RTP, visto que estas direções são paralelas a direção de vôo do levantamento aeromagnético utilizado na pesquisa.

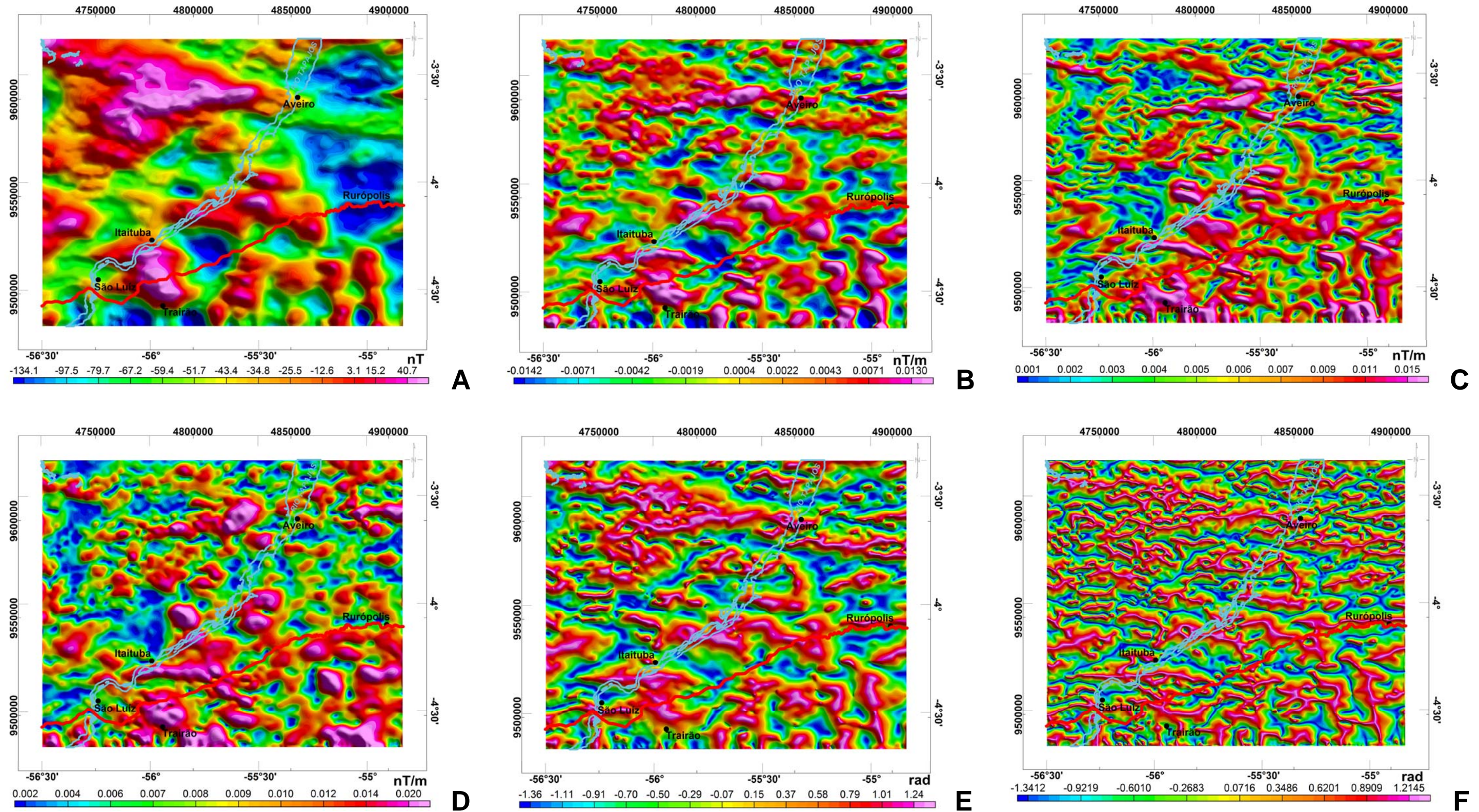


Figura 5.2-13: Mapas magnéticos da subárea Tapajós (A) mapa residual RTP continuado para **2.000 metros**; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem. Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

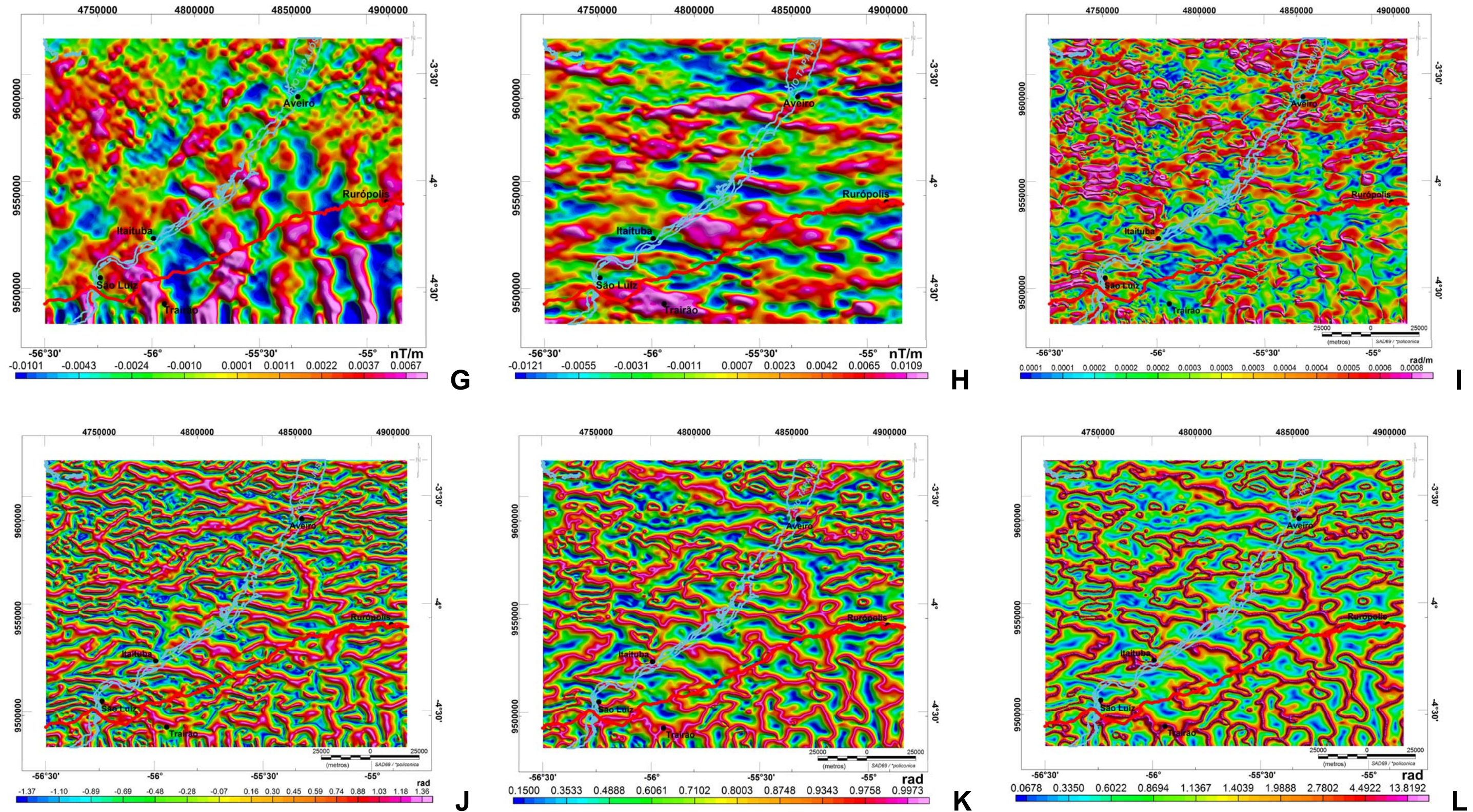


Figura 5.2-14: Mapas magnéticos da subárea Tapajós (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) mapa *Theta* e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total. Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

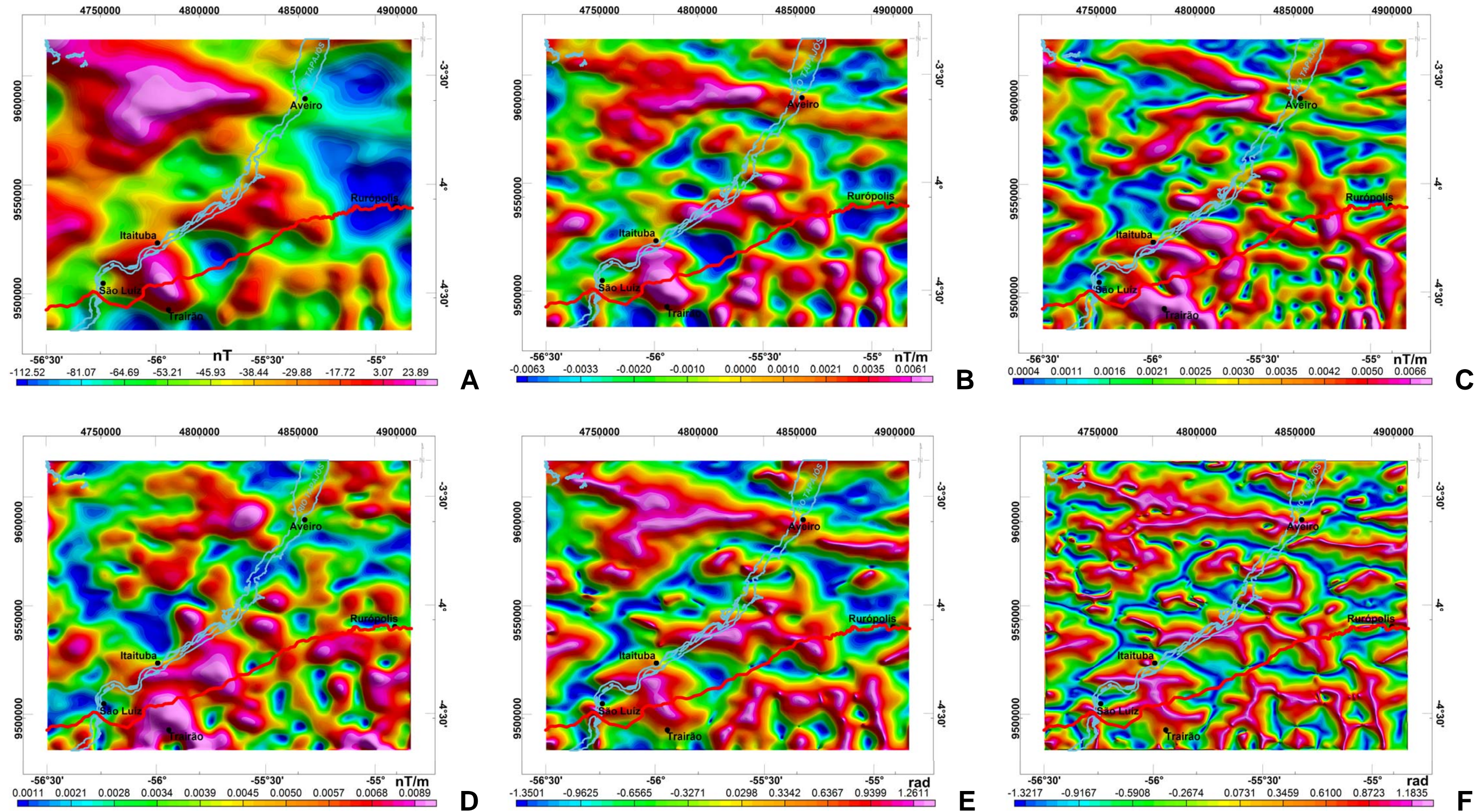


Figura 5.2-15: Mapas magnéticos da subárea Tapajós (A) mapa residual RTP continuado para **5.000 metros**; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem. Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

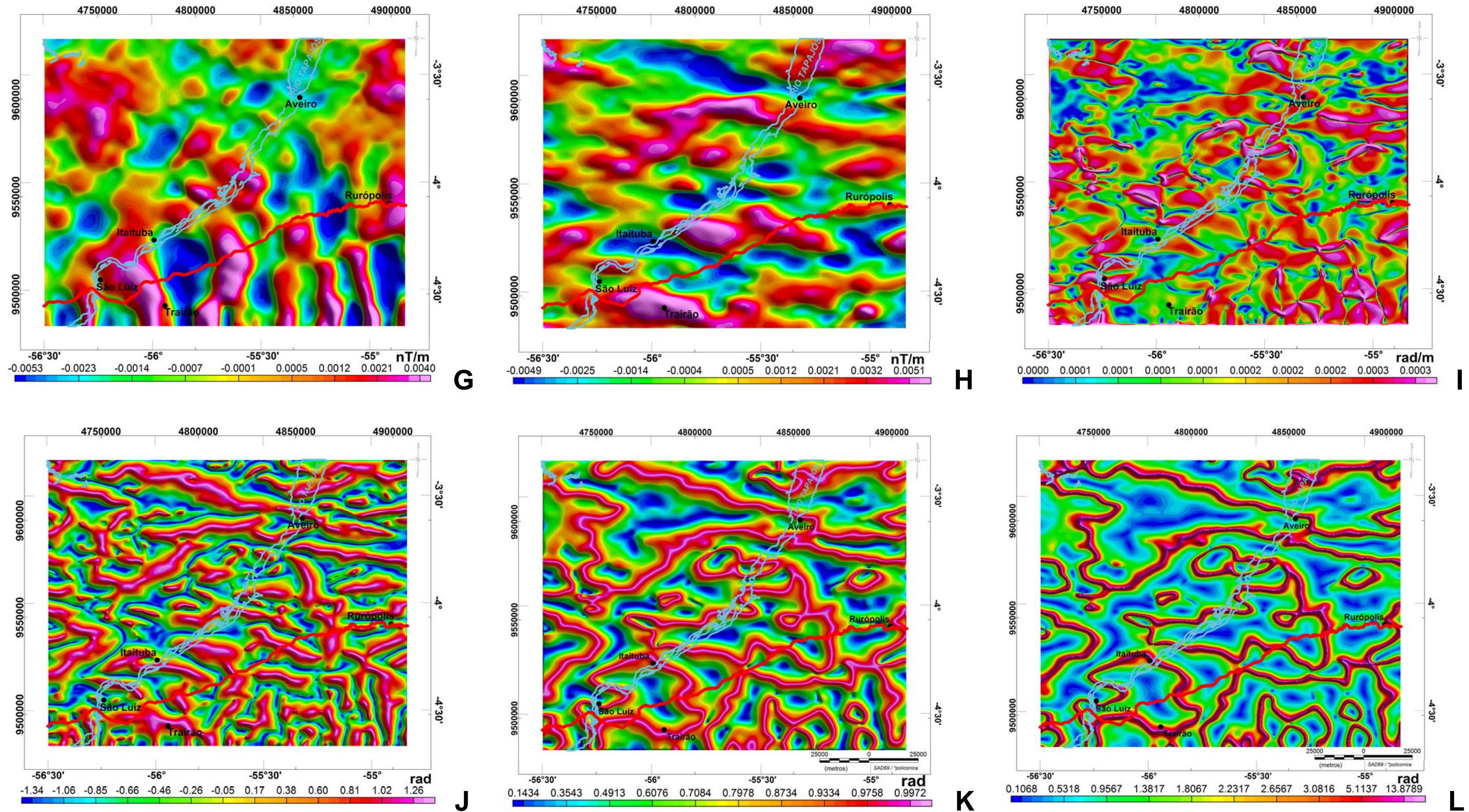


Figura 5.2-16: Mapas magnéticos da subárea Tapajós (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) mapa Theta e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total.

A análise integrada dos lineamentos geofísicos derivados dos filtros de realce permitiu elaborar um mapa de interpretação qualitativa onde as principais fontes anômalas para a subárea são representadas (Figura 5.2-17). A partir deste mapa foram elaborados diagramas de roseta de frequência e comprimento dos lineamentos geofísicos que permitem visualizar direções preferenciais N70-80W e E-W e subordinadas N60-70E (Figura 5.2-18).

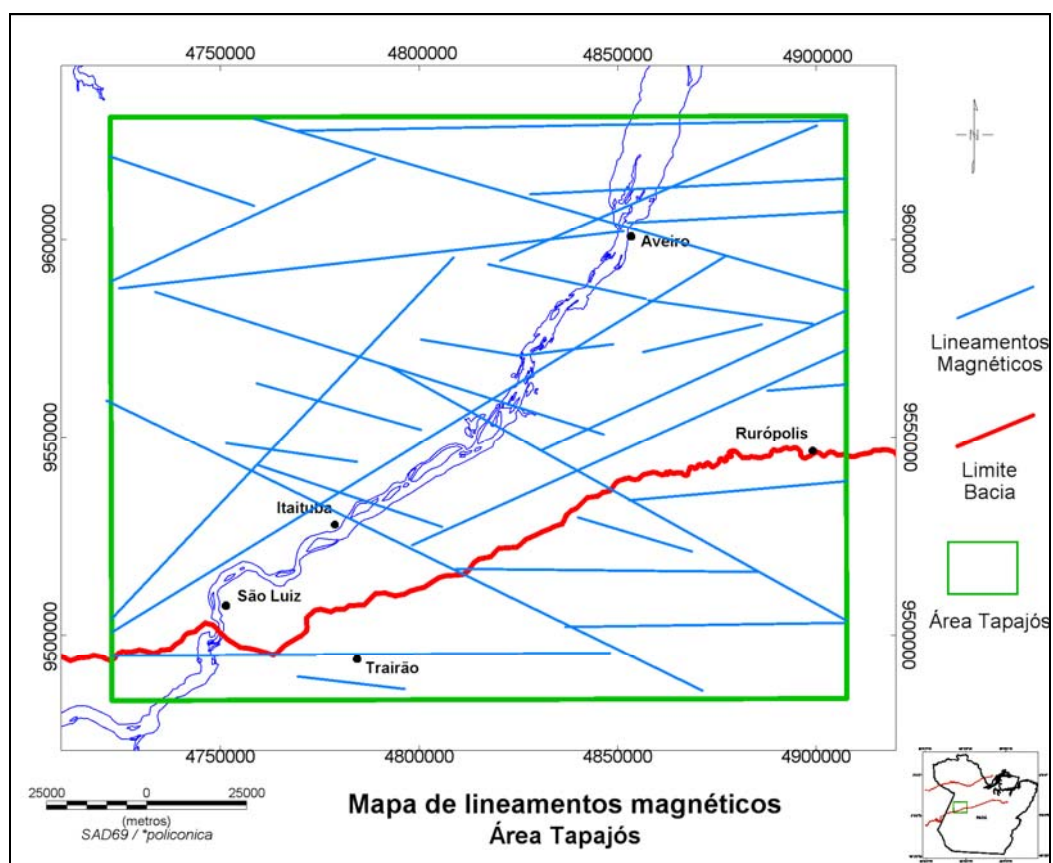


Figura 5.2-17: Mapa de lineamentos magnéticos da subárea Tapajós.

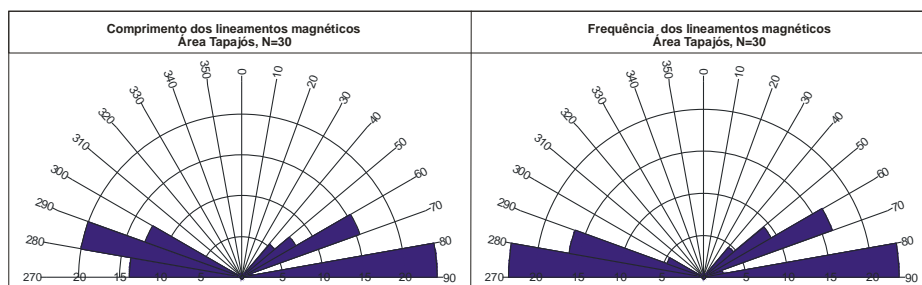


Figura 5.2-18: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos geofísicos da subárea.

De acordo com Bongiolo *et al.* (2011b), as principais tendências observadas possuem direções NW-SE e E-W, correspondentes a estruturas do embasamento que penetram na Bacia do Amazonas, além da presença de tendências NE-SW subordinadas. No trabalho de Bongiolo *et al.* (2011b) são sobrepostas aos lineamentos magnéticos estruturas definidas pelo RADAM (1975), Wanderley Filho (1991) e CPRM (2008), para efeito de comparação. A Figura 5.2-19 mostra um padrão concordante das direções NW-SE e E-W, destacando-se os lineamentos Faro-Juruti (NW-SE), que na magnetometria é segmentado por estruturas de direção NE-SW (mais recentes ou reativadas) e Tapajós (NE-SW).

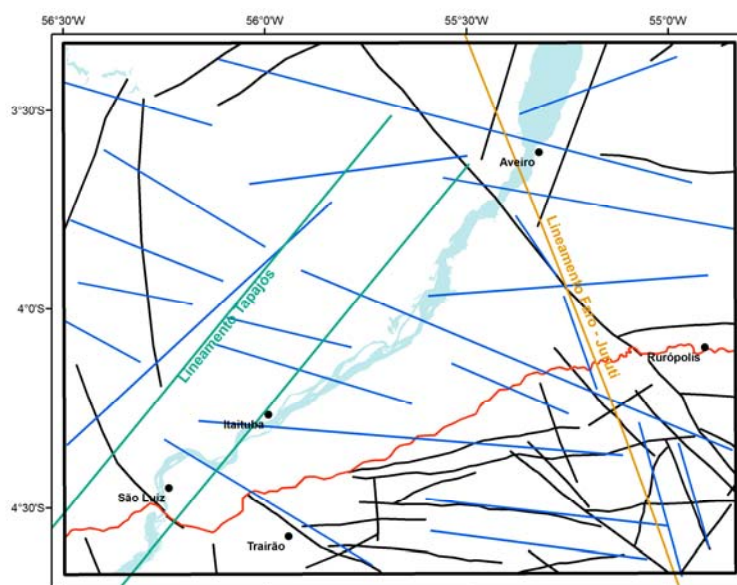


Figura 5.2-19: Mapa de lineamentos magnéticos (azul) indicando estruturas definidas por vários autores (RADAM, 1975 – verde; WANDERLEY FILHO, 1991 – laranja; CPRM, 2008 – preto). Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

5.2.6.2 Interpretação semi-quantitativa

Na análise semi-quantitativa foram empregados métodos estatísticos de obtenção de profundidades de fontes magnéticas: o espectro de potência radial e a deconvolução de Euler.

Na Figura 5.2-20 está representado o espectro de potência radial, aplicado no sentido de discriminar fontes anômalas profundas de sinais de alta frequência, para a subárea de estudo, gerado a partir do mapa magnético residual, o qual

apresenta o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y. Também são apresentadas nesta figura estimativas estatísticas de profundidade de fontes profundas, intermediárias e rasas.

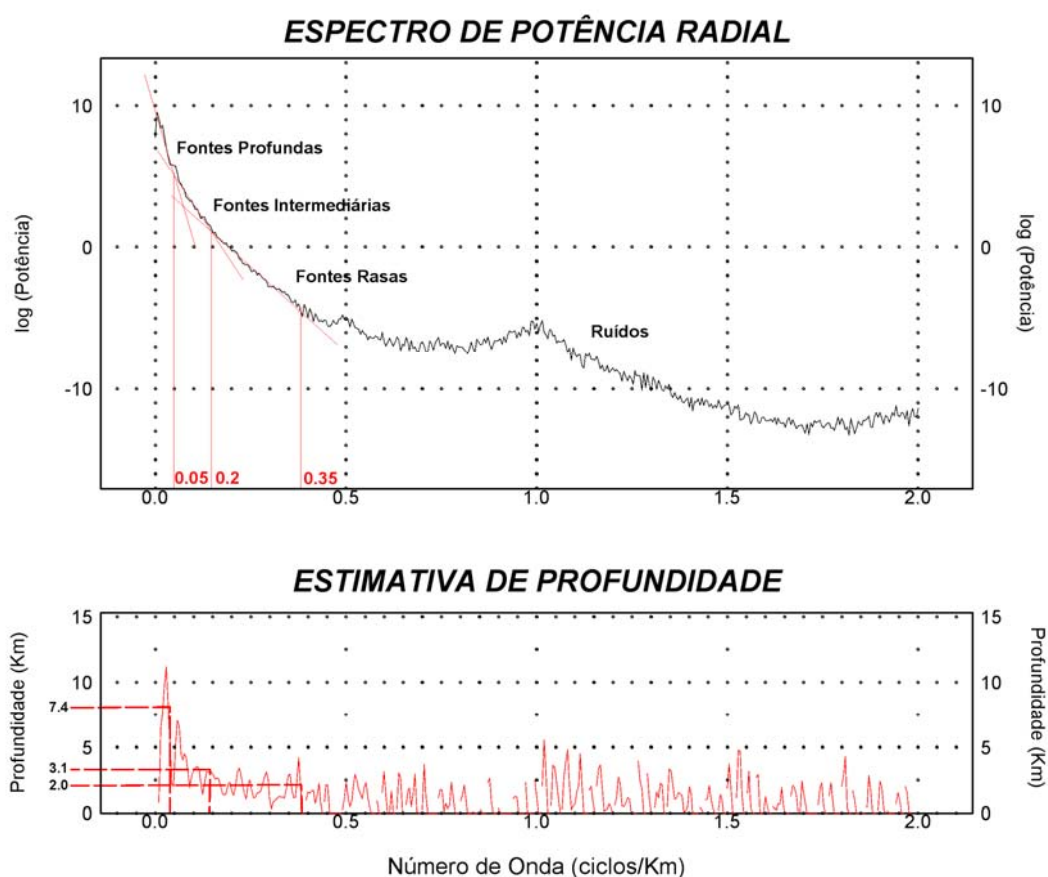


Figura 5.2-20: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual.

De acordo com a Figura 5.2-20 são discriminadas três partições marcadas pelas mudanças no declive da função espectral, as quais correspondem às profundidades das fontes, que são:

- fontes profundas: apresentam comprimento de onda maior que 20 km e profundidades médias entre 7,4 a 12 km;
- fontes intermediárias: discriminadas entre os comprimentos de onda de 20 km e 5 km, representando profundidades médias das fontes de 3,1 a 7,4 km;

- fontes rasas + ruídos: na última partição do espectro estão presentes as fontes correspondentes a corpos rasos e ruídos, os quais apresentam comprimentos de onda de 5 a 2,9 km e profundidades médias de 3,1 a 2,0 km, apesar de estarem relacionadas a profundidades variadas devido aos ruídos.

O método de deconvolução de Euler foi aplicado sobre os dados do campo magnético residual da subárea de estudo, para os modelos dique e contato, como mostram a Figura 5.2-21 e a Figura 5.2-22, respectivamente. Sobrepostos às soluções geradas são apresentados os lineamentos magnéticos obtidos a partir da interpretação qualitativa.

Para o modelo dique, de acordo com o histograma gerado, foram obtidas soluções de profundidades que variam de 500 a <4.000m divididas em classes e cores para visualização. Observa-se a ausência de soluções no contexto da bacia e a presença de soluções semi-circulares no contexto do embasamento e adentrando a bacia, fato que corrobora com os filtros de realce Gz e ASA, sugerindo a representação de corpos do embasamento profundos, sob os sedimentos, sendo que a profundidade das soluções obtidas concentra-se principalmente no domínio do embasamento (3.000 a 4.000m).

Para o modelo contato foram geradas estruturas com profundidades entre 200 e 1.700 metros. Tornou-se difícil a delimitação de lineamentos e/ou estruturas representativas, talvez pela sobreposição de fontes como, por exemplo, às relacionadas a soleiras de diabásio da bacia.

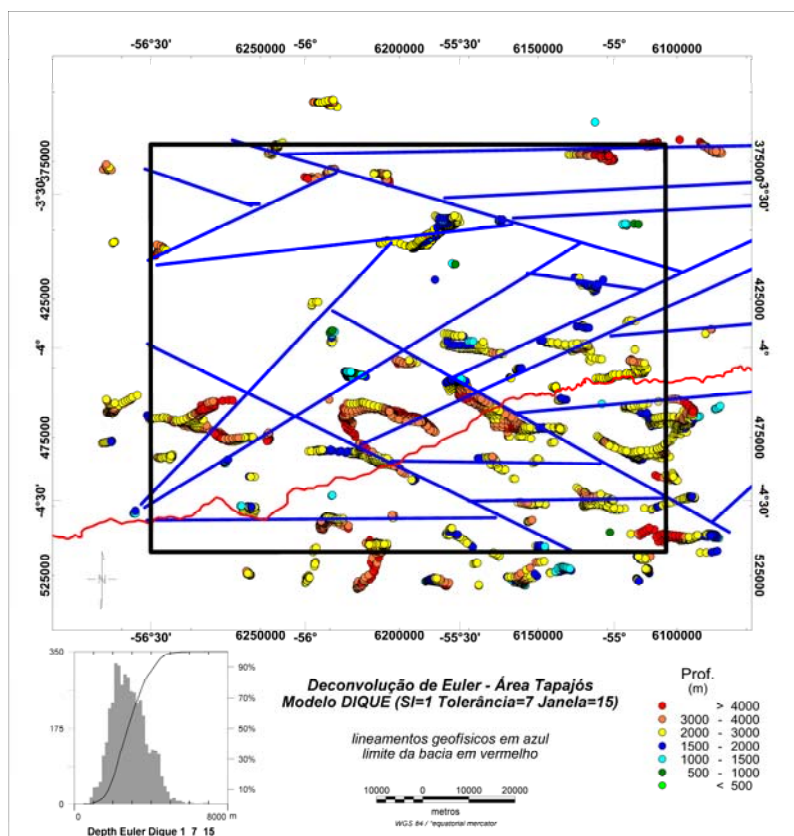


Figura 5.2-21: Mapa das soluções de Euler da subárea Tapajós para o modelo dique.

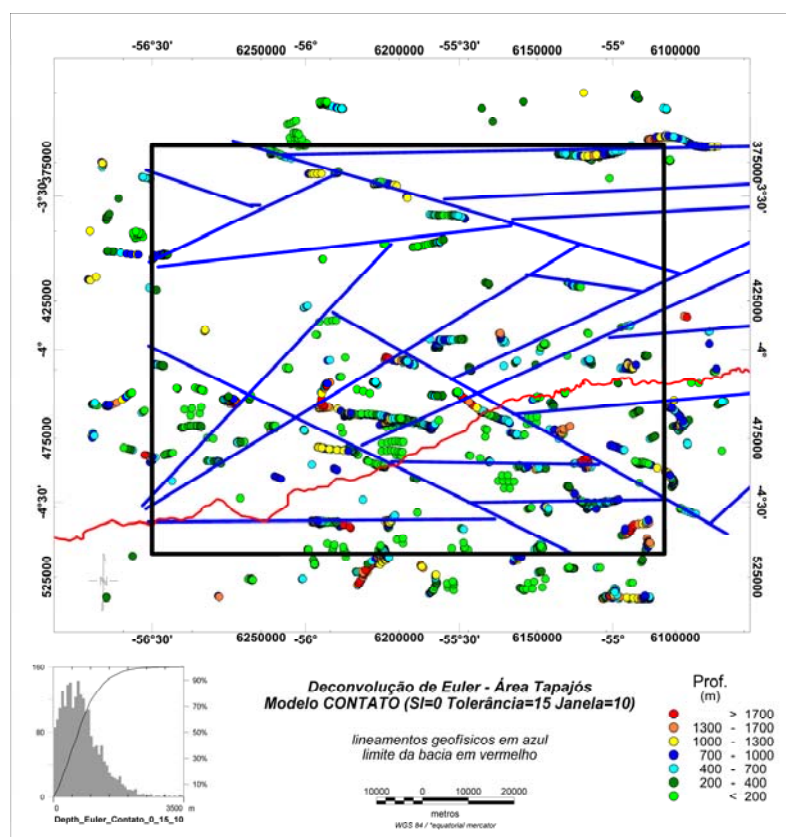


Figura 5.2-22: Mapa das soluções de Euler da subárea Tapajós para o modelo contato.

5.2.6.3 Integração dos dados geofísico-estruturais

Este item apresenta a sobreposição das interpretações dos lineamentos geofísicos em correspondência aos lineamentos estruturais definidos por Santos (2009) através de um mapa integrado (Figura 5.2-23). Em continuidade, com base na coincidência ou proximidade de suas respectivas direções principais, foram estabelecidas faixas estruturais (Figura 5.2-24). Os resultados desta sobreposição de lineamentos permitem tecer algumas considerações, listadas a seguir:

- As faixas estruturais exibem direções NE e NW subparalelas às grandes estruturas propostas na literatura (e.g. REZENDE & BRITO, 1973; CORDANI, 1984; WANDERLEY FILHO, 1991 e COSTA, 2002), preferencialmente para a bacia e para o embasamento, respectivamente;
- As faixas estruturais de direção E-W predominam no embasamento, mas se propagam no interior da bacia com razoável continuidade na seção mesozóica-cenozóica a Oeste de Aveiro (Figura 5.2-24). Tal estrutura coincide com segmento meridional da linha de charneira da bacia (WANDERLEY FILHO, 1991);
- A faixa estrutural de direção WNW na porção setentrional da subárea cruza a feição EW anterior nas proximidades de Aveiro, ponto a partir do qual, para Norte, o rio Tapajós se alarga e altera seu curso;
- Associações de faixas estruturais NW, comuns a bacia e ao embasamento, e NE compartimentam a bacia em blocos estruturais romboédricos, como se observa a Nordeste de Itaituba;
- Faixas estruturais NE predominam na bacia, embora lineamentos SRTM nesta direção existam entre Trairão e Rurópolis no embasamento (Figura 5.2-24);
- Os diagramas de roseta dos lineamentos SRTM e magnéticos (Figura 5.2-10 e Figura 5.2-18) exibem grande similaridade, tanto para comprimento quanto para frequência, ressaltando direções N70W, N60-70E e E-W.

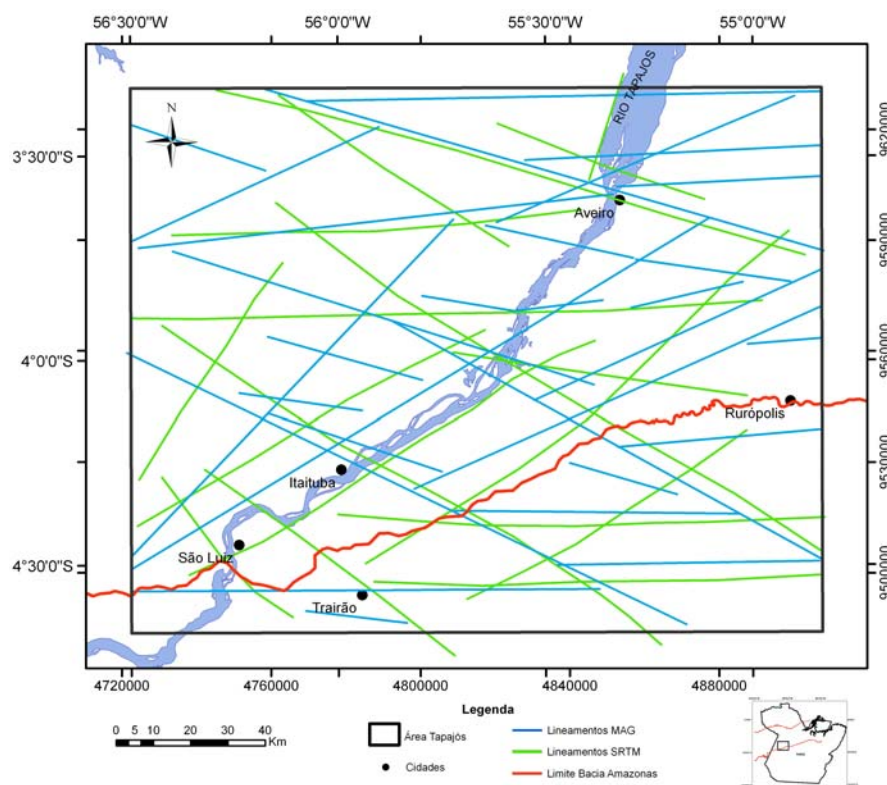


Figura 5.2-23: Mapa dos lineamentos SRTM (verde) e magnéticos (azul) da subárea Tapajós indicando o limite da Bacia do Amazonas (vermelho) e o rio Tapajós.

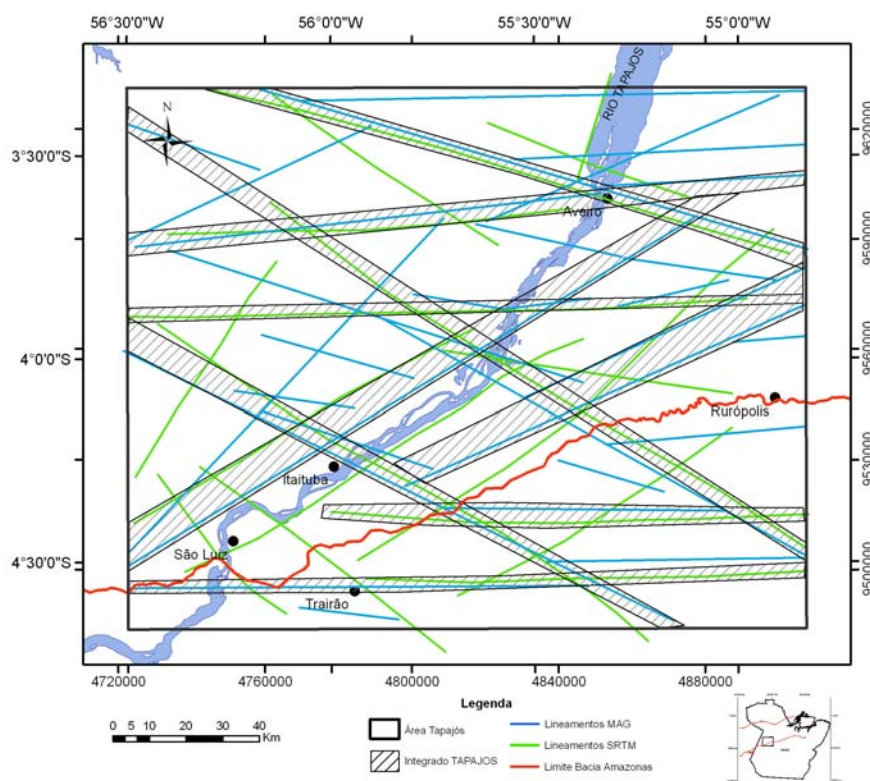


Figura 5.2-24: Mapa dos lineamentos SRTM (verde) e magnéticos (azul) da subárea Tapajós indicando as faixas estruturais, o limite da Bacia do Amazonas (vermelho) e o rio Tapajós.

5.2.7 Discussão

Na análise qualitativa, as principais estruturas determinadas através do mapa magnético residual RTP e suas continuações para 2.000 e 5.000 metros, associados aos produtos dos métodos de realce de anomalias, se dispõem segundo direções preferenciais N70-80W e E-W e subordinadas N60-70E.

A integração das estruturas geofísicas se harmonizou tanto aos lineamentos propostos por Santos (2009) quanto aos propostos na bibliografia. Assim, se verificou concordância nas direções preferenciais e secundárias, permitindo constatar que as tendências NW, presentes no embasamento e por vezes adentrando a bacia, são mais antigas do que as feições NE e E-W.

A análise feita a partir do espectro de potência radial mostrou fontes profundas com estruturas de direções NW, NE e E-W e profundidades de 7,4 a 12 km; e fontes intermediárias NW e NE adentrando a bacia com profundidades de 3 a 7,4 km.

Os principais resultados da análise semi-quantitativa através da deconvolução de Euler para o modelo dique foi a ausência de soluções na bacia e a presença de feições semi-circulares no embasamento adentrando a bacia, com profundidades de no máximo 4 km. Para o modelo contato as respostas não foram satisfatórias, tornando-se necessária a realização de mais testes com este modelo.

5.3 SUBÁREA XINGU

5.3.1 Localização

A subárea Xingu, com aproximadamente 27.000 km², localiza-se na região Setentrional do Brasil, na porção Centro-Leste do Estado do Pará, limitada pelas coordenadas geográficas 2°31' e 3°51' de latitude Sul e 50°57' e 52°36' de longitude Oeste (Figura 5.3-1).

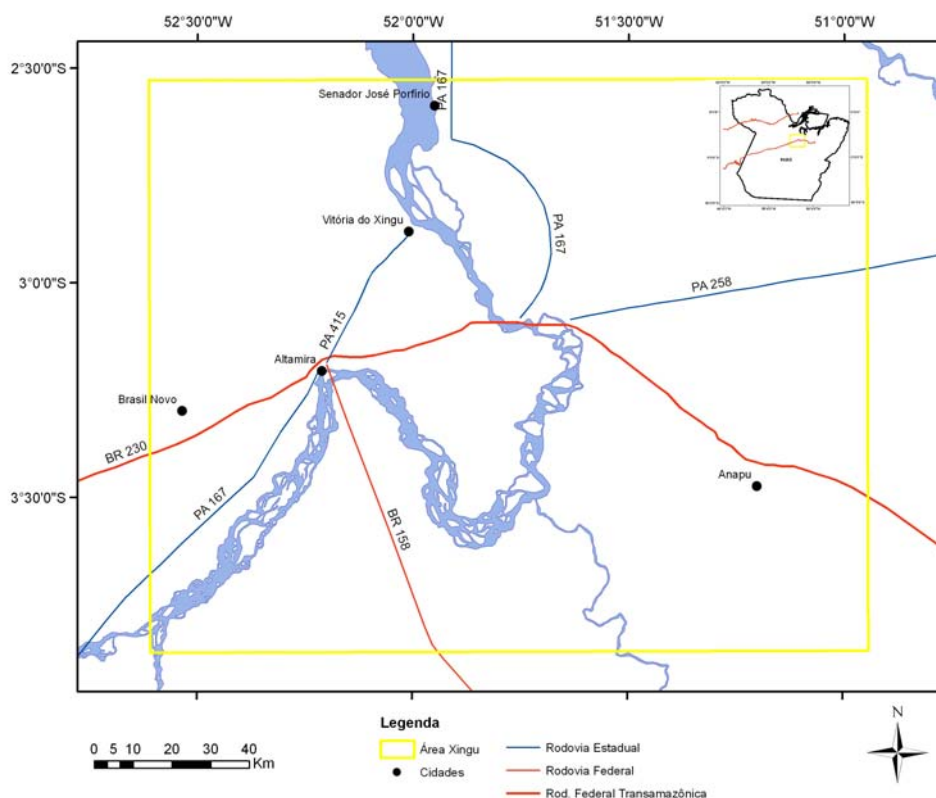


Figura 5.3-1: Mapa de localização e acessos à subárea Xingu.

A cidade de Altamira corresponde ao principal centro urbano da região e está localizada às margens do rio Xingu. A região é informalmente denominada de “Volta Grande do rio Xingu”, devido ao curso sinuoso do rio.

O acesso à área de estudo pode ser realizado de duas maneiras principais: via terrestre ou fluvial. A partir de Marabá (PA), a melhor opção de acesso terrestre é

pela Rodovia Transamazônica (BR-230), sendo necessário percorrer cerca de 460 quilômetros até a cidade de Altamira. Tem-se acesso à área também através do rio Xingu, em percurso de barco de Santarém a Vitória do Xingu.

5.3.2 Material

De acordo com o Capítulo 4, a base dos materiais utilizados foi:

- Mapa geológico da CPRM na escala 1:1.000.000 (Figura 5.3-2);
- Imagens de SRTM com resolução de 90 metros, obtidas no site da USGS (Figura 5.3-3);
- Mapas de lineamentos estruturais em escalas 1:800.000 e 1:200.000 de acordo com Perico (2009) (Figura 5.3-4 e Figura 5.3-5);
- Mapa magnético residual CPRM (2002) (Figura 5.3-6).

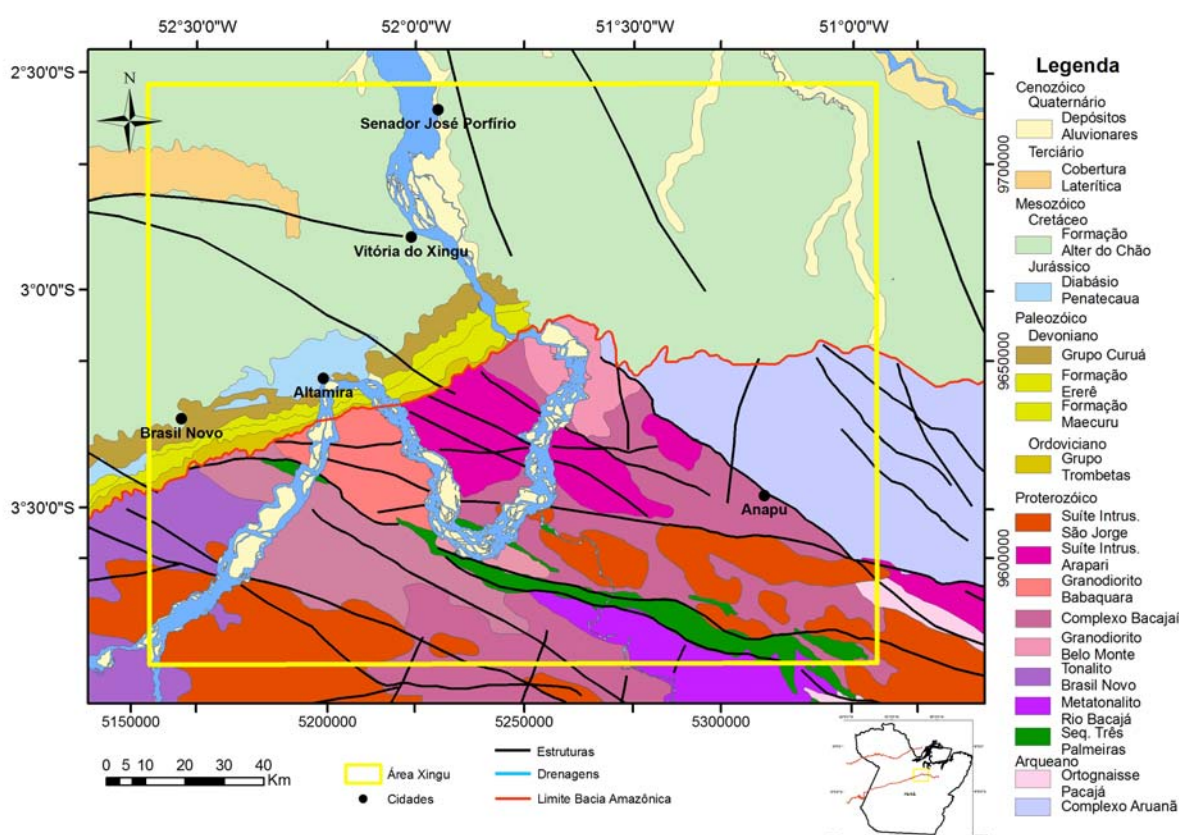


Figura 5.3-2: Mapa geológico da subárea Xingu (CPRM, 2008).

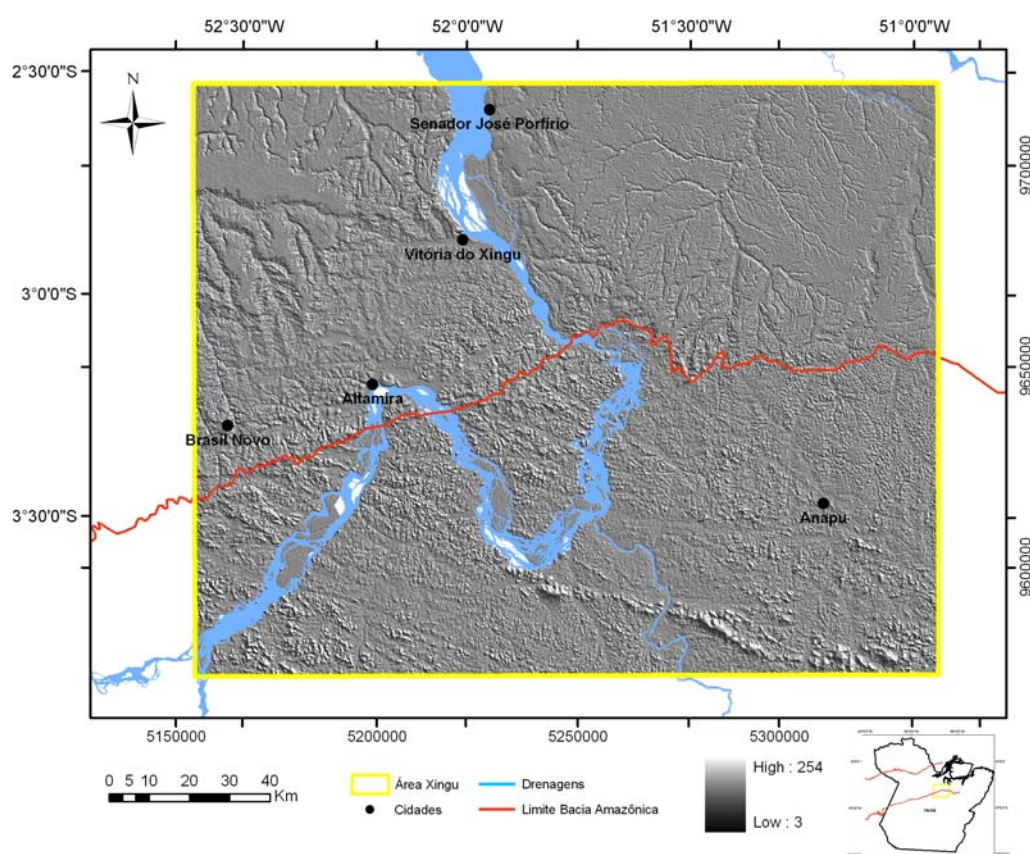


Figura 5.3-3: Imagem SRTM com pseudo-iluminação de 45°.

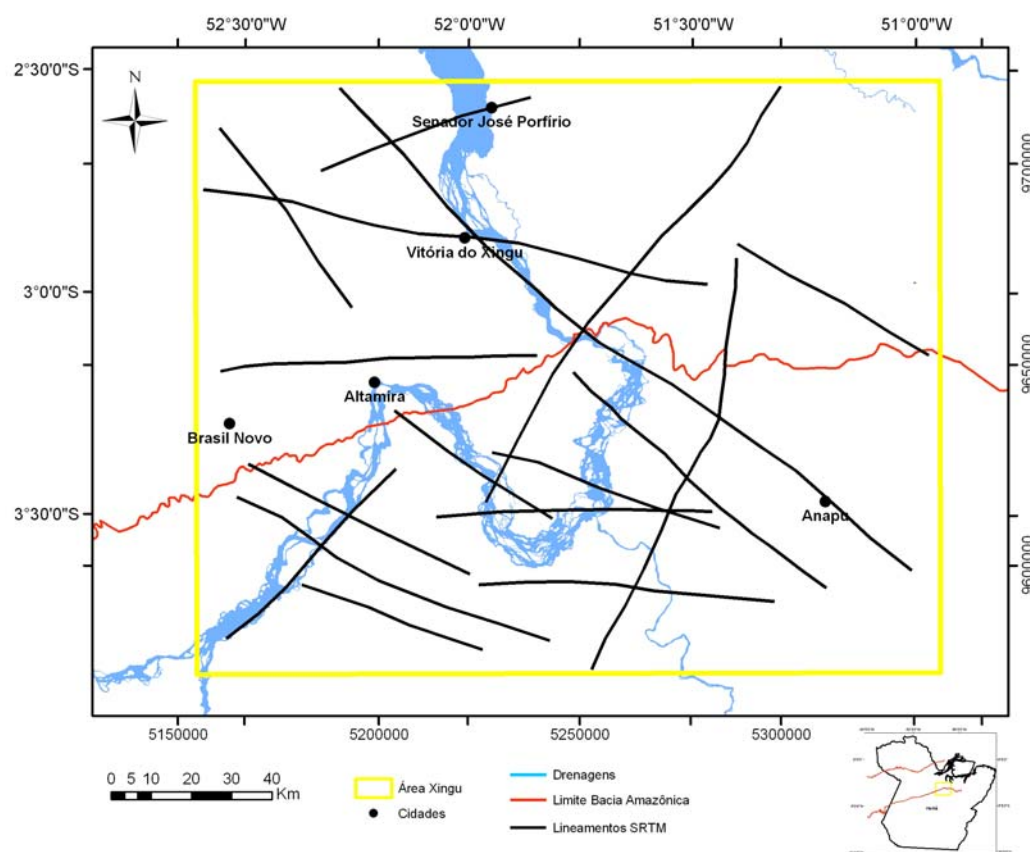


Figura 5.3-4: Lineamentos interpretados em escala 1:800.000. Fonte: Perico (2009).

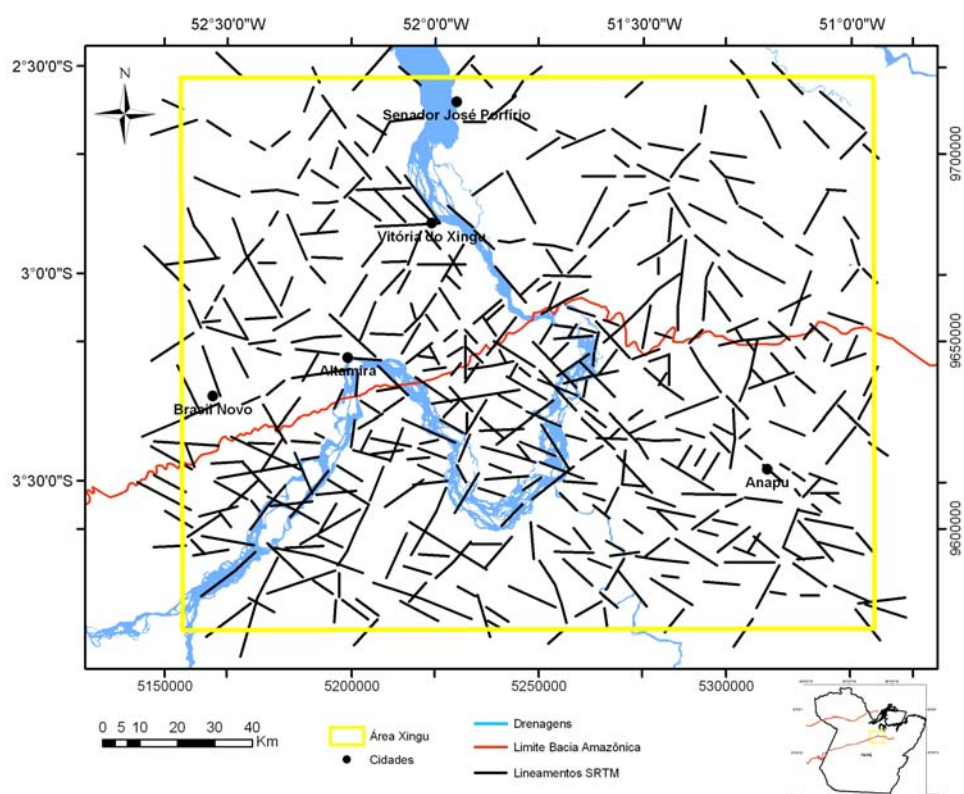


Figura 5.3-5: Lineamentos interpretados em escala 1:200.000. Fonte: Perico (2009).

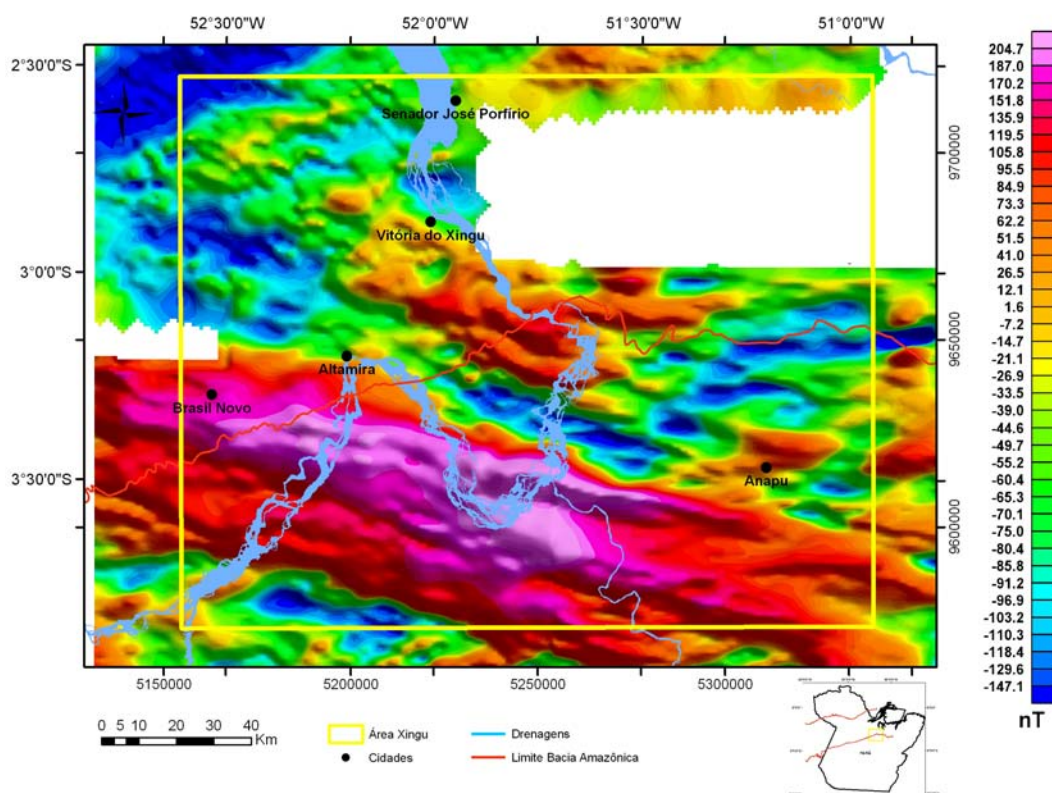


Figura 5.3-6: Mapa magnético residual da subárea Xingu. Rio Xingu (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

5.3.3 Geologia da subárea Xingu

A área encerra rochas sedimentares do flanco Sul da Bacia do Amazonas e rochas ígneas e metamórficas do Cráton Amazônico.

De acordo com a proposta de Tassinari & Macambira (1999, 2004) a subárea de estudo está situada na Província Maroni-Itacaiúnas, a qual é definida como uma larga faixa na borda Norte-Nordeste do Cráton Amazônico com evolução principal ocorrida no intervalo de 2,2 a 1,95 Ga. Nela dominam rochas metavulcânicas e metassedimentares deformadas e metamorizadas nas fácies xisto-verde a anfibolito, bem como terrenos gnáissico-migmatíticos e granulíticos.

De acordo com Vasquez e Rosa-Costa (2008) a subárea de estudo está situada na Província Transamazonas, no Domínio Bacajá. Este Domínio é formado por granitóides, rochas supracrustais, granulitos, migmatitos e charnoquitos associados com gnaisses arqueanos remanescentes que teriam sido retrabalhados durante a Orogenia Transamazônica (VASQUEZ *et al.*, 2006).

De acordo com Barros *et al.* (2007), as rochas granitóides observadas na subárea de estudo são correlacionáveis a rochas Paleoproterozóicas formadas em um evento magmático de escala global.

Afloram na subárea rochas de idades arqueanas representadas pelo ortognaisse Pacajá que se apresenta na forma de corpos elípticos restritos de ortognaisses e migmatitos com metamorfismo na fácies granulito com *trend* WNW-ESE e pelo complexo Aruanã que é constituído por ortognaisses tonalíticos e graníticos com bandamento bem definido, leucossomas quartzo-feldspáticos fortemente re-hidratados e metamorfismo de alto grau. Inclui gnaisses granodioríticos e largas faixas de granulitos máficos que lembram diques máficos deformados.

No âmbito das rochas proterozóicas estão presentes na subárea a sequência Três Palmeiras composta por um conjunto de rochas metavulcano-sedimentares que sustentam uma serra de orientação WNW-ENE, metatonalito Rio

Bajacá; tonalito Brasil Novo representado por granitóides com deformação dúctil na forma de batólitos irregulares com direção regional NW-SE; granodiorito Belo Monte com granitóides leuco a mesocráticos; complexo Bacajaí representado por uma faixa metamórfica de alto grau na forma de granitóides catazonais intrusivos, orogênicos, gnaissificados, isotrópicos e com textura ígnea preservada; granodiorito Babaquara presente na forma de um corpo granitóide com relevo acidentado alongado segundo um *trend* regional NW-SE; e suíte intrusiva Arapará composta por charnoquitos e charno-enderbitos que ocorrem na forma de batólitos e *stocks* orogênicos e suíte intrusiva São Jorge onde ocorrem batólitos e plútons graníticos (monzo e sienogranitos), geralmente de formas alongadas segundo o *trend* regional NW-SE.

Para João *et al.* (1987) *apud* Perico (2009), as rochas da Bacia do Amazonas que ocorrem na subárea de estudo corresponderiam ao Grupo Trombetas/Formação Manacapuru (arenitos finos a conglomeráticos, em alguns locais maciços e com folhelhos subordinados), e à Formação Ererê (siltitos maciços intercalados com folhelhos e arenitos). Diques e soleiras de diabásio representam intrusões básicas de idade mesozóica. Ainda no Cenozóico teriam sido depositados arenitos, siltitos e argilitos da Formação Alter do Chão. Coberturas lateríticas e cascalhos, areia, silte e argila de aluviões completam a coluna estratigráfica.

5.3.4 Geologia estrutural da Bacia do Amazonas e do seu embasamento na subárea Xingu

As principais estruturas que afetam a subárea são representadas por falhas NW-SE com variações para WNW-ESE, as quais possuem direções coincidentes às orientações das sequências vulcano-sedimentares do embasamento e também direções NE-SW, E-W, NNE-SSW e NNW-SSE representadas em rochas da bacia de maneira subordinada, de acordo com João *et al.* (1987).

A Figura 5.3-7 mostra uma síntese regional dos diversos lineamentos propostos nas proximidades da subárea em estudo, tais como as feições lineares

definidas por Cordani *et al.* (1984), Carneiro e Jucá (1985) e Hasui *et al.* (1984) além das feições estruturais do Proterozóico Médio/Superior definidas em Costa & Hasui (1997), Wanderley Filho (1991) e Vasquez *et al.* (2008), onde há o predomínio de estruturas com direções NW-SE, NNW-SSE, ENE-WSW e NE-SW.

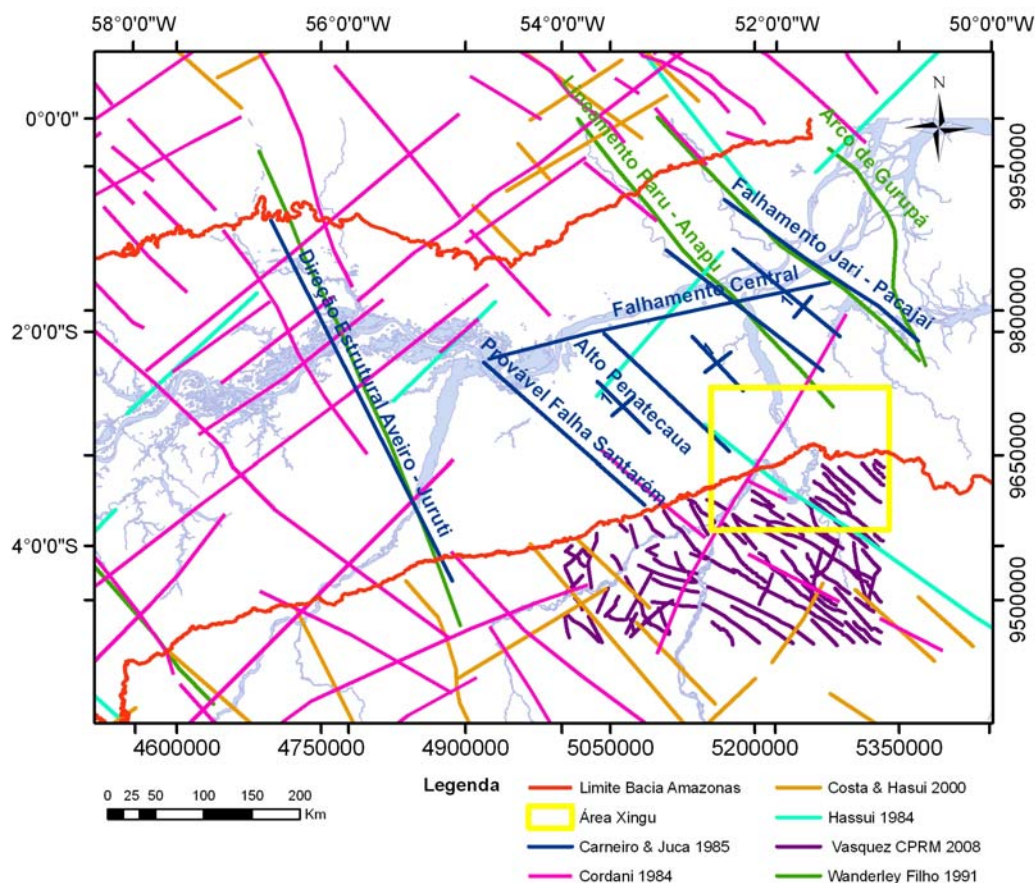


Figura 5.3-7: Lineamentos regionais definidos por diversos autores no contexto da subárea Xingu

Perico (2009) ao realizar análise estrutural sobre as rochas do embasamento e da Bacia do Amazonas, aflorantes na região de estudo, descreveu o embasamento como marcado por um *trend* estrutural NW bem evidente, formado por lineamentos com extensões médias de aproximadamente 30 km e espaçamento variável. Secundariamente, observam-se no embasamento lineamentos na direção NE. A Bacia do Amazonas contém lineamentos orientados, preferencialmente, para NNW e, secundariamente, para NE. As direções NW-SE e WNW-ESE destes lineamentos são paralelas às estruturas regionais observadas no terreno Bacajá (VASQUEZ, *et al.* 2005; FARACO, *et al.* 2005; BARROS *et al.*, 2007).

Foi observado por Perico (2009) que no embasamento existem lineamentos SRTM positivos e negativos, penetrativos na direção NW, principalmente na porção Sudoeste da subárea e que no embasamento são observadas importantes feições penetrativas similares, que, aparentemente, sofrem inflexão para NNW na Bacia do Amazonas. Importantes tendências com direções ENE e NE também são observadas.

O padrão NW reconhecido no embasamento também é descrito por Vasquez *et al.* (2005). Os lineamentos descontínuos de direção NW que foram descritos no trabalho de Perico (2009) podem corresponder, localmente, ao limite entre os blocos crustais Belém e Araguacema, definidos por Hasui *et al.* (1984). Conforme observado no mapa geológico e dados de campo, o *trend* NW parece representar localmente intercalações litológicas de granitos, rochas metabásicas e cristas de quartzito, estruturas sin-magmáticas em granitos ou zonas de cisalhamento dúctil. Perico (2009) observou que as orientações das fraturas independem da resolução do mapa e da escala adotada, pois foram verificadas em multi escalas.

Perico (2009) também notou várias feições lineares com direção NW, principalmente lineamentos negativos, que representam, no conjunto, estruturas com extensões de dezenas a centenas de metros. Como esses lineamentos têm caráter retilíneo e grande penetratividade na subárea de estudo, devem corresponder a descontinuidades litosféricas do embasamento. O traçado das feições lineares também pode representar a presença de camadas de laterita. Conforme visto em campo, são comuns na região concentrações de laterita em altos topográficos. É provável que os locais com laterita tenham maior resistência à alteração intempérica e, desta maneira, representem altos de relevo.

Ao analisar o mapa de lineamentos, Perico (2009) refere que na “Volta Grande do rio Xingu”, existe elevada frequência de lineamentos de dezenas de quilômetros nos domínios do embasamento. É provável que parte do curso do rio Xingu tenha sido controlado pelas fraturas e falhas NW-SE e NE-SW, descritas anteriormente. De acordo com Lillesand *et al.* (2004), as juntas, por serem planos de

fraqueza nas rochas, geralmente formam superfícies visíveis em imagens e controlam a formação de canais de rios. De forma semelhante ao embasamento, porém subordinada, é possível observar uma concentração de lineamentos na porção Sudoeste da subárea Xingu em domínios da Bacia do Amazonas.

5.3.5 Análise de lineamentos

As imagens SRTM (Figura 5.3-3), com resolução de 90 metros, foram utilizadas por Perico (2009), durante o decorrer do Projeto CATEA, como base para a identificação de estruturas no relevo com as pseudo-iluminações nos sentidos 0°, 45°, 90° e 315°, para realçar as morfoestruturas e facilitar o reconhecimento dos lineamentos estruturais.

Os principais traçados correspondem a feições retilíneas negativas e positivas representadas por lineamentos com comprimentos de dezenas a centenas de quilômetros. Os lineamentos foram traçados em escala regional (1:800.000), designados lineamentos de primeira ordem, contínuos e com mais de 10 km, visando identificar as principais estruturas. Os lineamentos também foram interpretados na escala 1:200.000.

A partir dos lineamentos traçados por Perico (2009), diagramas de rosetas de comprimento e frequência acumulados foram confeccionados nesta tese, utilizando o *software RockWorks* para análise geral das direções destes lineamentos. As direções preferenciais dos lineamentos são N50-60W e E-W, com comprimento e frequência maiores. A direção N50-60E aparece de forma secundária, como mostra a Figura 5.3-8.

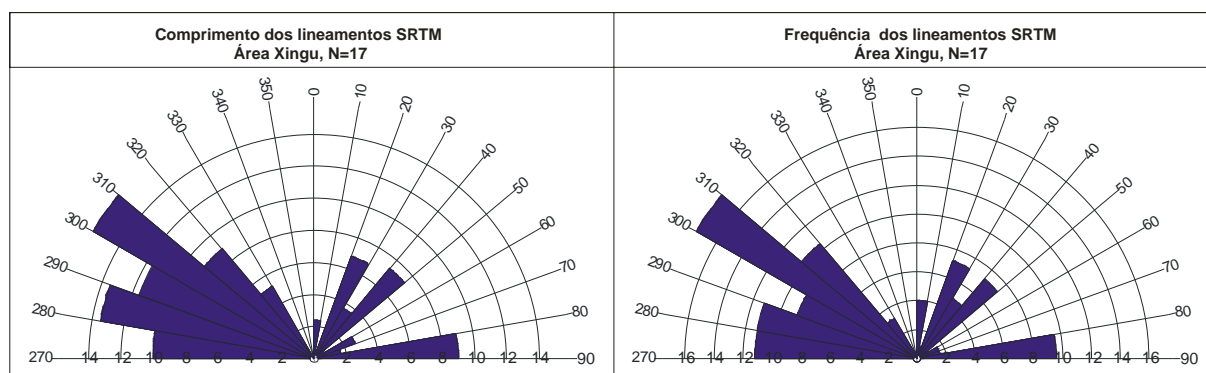


Figura 5.3-8: Diagramas de rosetas de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos estruturais da subárea Xingu.

Estudos realizados por Perico (2009) através de análise de imagens de sensores remotos e medidas de campo mostraram que algumas estruturas com direção NW observadas na bacia, apesar de possuírem orientações um pouco diferentes do padrão do embasamento contêm, aparentemente, uma relação genética. A formação destas estruturas NW pode estar correlacionada com reativações de antigas anisotropias do embasamento. Os padrões NE e E-W refletem, provavelmente, deformações em condições rúpteis com a formação de fraturas e lineamentos de direção NE, subparalelos aos limites atuais da bacia, possivelmente têm ligação com anisotropias que estariam controladas pelo eixo das bacias do Solimões e Amazonas.

5.3.6 Arcabouço geofísico

5.3.6.1 Interpretação qualitativa

A análise do arcabouço geofísico da subárea Xingu foi apoiada na série de aerolevantamentos do Brasil ao Milionésimo, elaborado pela CPRM (2002), cujos dados digitais são apresentados na forma de malha regular de 1.000x1.000 metros e continuados para uma altura média de voo de 1.000 metros (Figura 5.3-6). Para o processamento e interpretação qualitativa dos dados magnéticos e aplicação da

técnica de RTP (redução ao polo) da subárea de estudo, fez-se uso do *software* Oasis Montaj v. 6.3 da Geosoft™.

Neste tópico são apresentados os mapas magnéticos da subárea reduzidos ao polo e derivados dos métodos de realce de anomalias descritos nos capítulos 2 e 3, os quais ensejaram elaborar um mapa preliminar de interpretação magnética qualitativa. Todos os mapas foram pseudo-iluminados na direção N45E, com a finalidade de melhorar a apresentação e realçar as estruturas de interesse.

A análise do mapa magnético residual RTP (Figura 5.3-9), apesar de indicar as principais tendências da subárea, exibe sinais de alta frequência espacial, reflexo de fontes rasas, os quais podem se transformar em ruídos, como resultado dos métodos de realce apresentados a seguir.

Para minimizar este problema, inicialmente os dados do mapa magnético residual RTP foram submetidos a continuações ascendentes, para simular os resultados decorrentes nas altitudes de 2.000 e 5.000m, os quais são exibidos na Figura 5.3-10, onde se observa a eliminação de grande parte dos sinais de alta frequência espacial do mapa residual original (1.000m de altura), realçando as fontes anômalas profundas (maiores comprimentos de onda).

Outro problema identificado nesta subárea foi a falta de cobertura de dados magnéticos no contexto da bacia, prejudicando a identificação de estruturas na porção nordeste da subárea, não sendo possível uma boa correlação temporal entre as estruturas mapeadas.

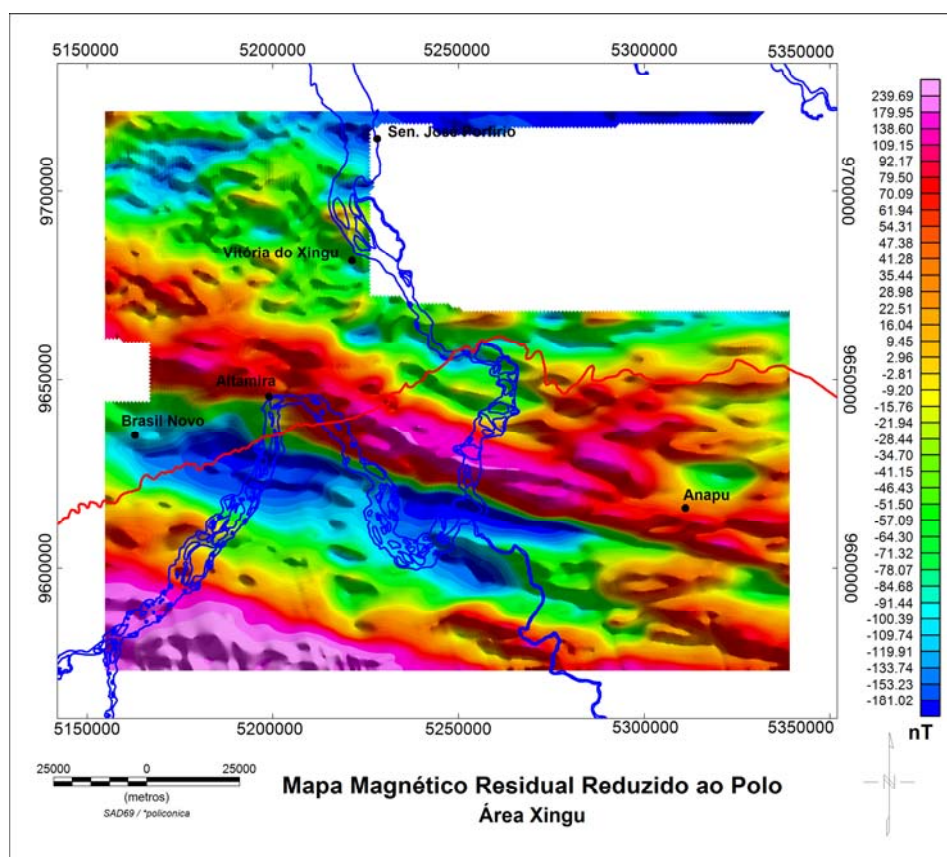


Figura 5.3-9: Mapa magnético residual da subárea Xingu reduzido ao polo (RTP). Rio Xingu (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

A principal fonte anômala observada no bloco diagrama da subárea Xingu é relacionada a rochas do embasamento, as quais ocorrem num *trend* de direção preferencial NW, persistente em profundidade e já mapeado por diversos autores.

A interpretação magnética qualitativa envolveu o traçado dos principais lineamentos geofísicos sobre os diversos mapas magnéticos derivados dos métodos de realce de anomalias descritos no Capítulo 2, visualizados nos mosaicos da Figura 5.3-11 e Figura 5.3-12 (mapas gerados a partir do campo continuado para 2.000 metros) e nos mosaicos da Figura 5.3-13 e Figura 5.3-14 (mapas gerados a partir do campo continuado para 5.000 metros).

Julgou-se conveniente aplicar os filtros de realce sobre os campos continuados para 2.000 e 5.000 metros, reduzidos ao polo, no intuito de realçar fontes intermediárias a profundas, como também, de anular e/ou atenuar a influência fontes rasas e de ruídos.

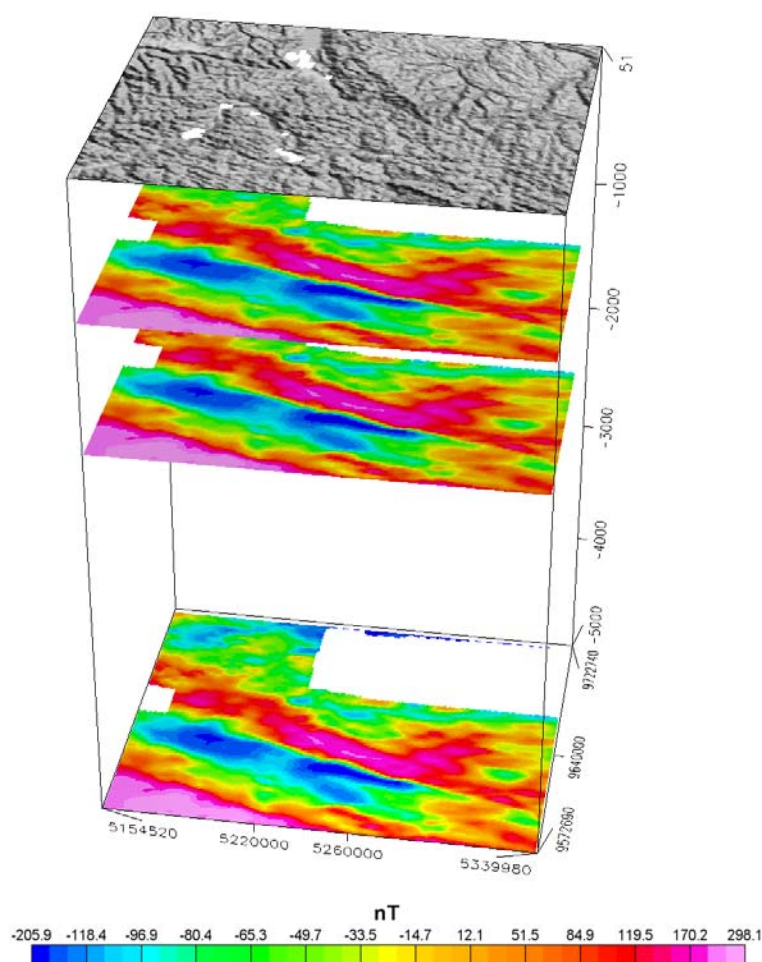


Figura 5.3-10: Bloco diagrama da subárea Xingu com mapa SRTM, mapa magnético residual RTP (1.000 metros), mapas continuados a 2.000 e 5.000 metros.

A resposta apresentada para cada filtro, nos diferentes campos continuados foi analisada separadamente, de acordo com a característica de realce de cada método, seja ele detector de centros ou de bordas de anomalias magnéticas e, a partir da interpretação sobre os mesmos, foram traçados os lineamentos geofísicos.

A interpretação qualitativa do mapa magnético residual RTP (Figura 5.3-9) mostrou dois domínios magnéticos bem evidenciados, paralelos entre si, caracterizados por anomalias magnéticas positivas com amplitudes entre 97 e 230 nT que cortam a área de estudo na porção Central e Sul, com direção NW.

Os filtros do gradiente vertical (Gz-Figura 5.3-11B e Figura 5.3-13B) e da amplitude do sinal analítico (ASA-Figura 5.3-11D e Figura 5.3-13D), permitiram visualizar e delinear uma grande estrutura de direção NW que corta a subárea, bem

como, algumas feições de direção NE, bastante segmentadas na sua porção Noroeste.

O mapa do gradiente horizontal total (GHT-Figura 5.3-11C e Figura 5.3-13C) foi utilizado na tentativa de delimitar as bordas das fontes magnéticas. Segundo Verduzco *et al.* (2004), corpos magnéticos muito espessos quando avaliados pelo método do gradiente horizontal total tem suas bordas facilmente delimitadas. Corpos magnéticos pouco espessos e contíguos são mais difíceis de serem interpretados, pois o método não é suficientemente sensível nestes casos.

O mapa do gradiente horizontal total permitiu a delimitação de um grande corpo magnético, de direção NW, homogêneo e retilíneo que corta a subárea de estudo. Na porção central observa-se grande concentração de pequenas estruturas orientadas preferencialmente para NW, heterogêneas, porém interrompidas.

Os mapas magnéticos de inclinação do sinal analítico (ISA-Figura 5.3-11E,F e Figura 5.3-13E,F) de 1ª e 2ª ordem foram utilizados para a interpretação dos eixos dos corpos magnéticos, sendo possível observar uma estruturação predominantemente segundo NW, contínua no domínio do embasamento e NE, mais segmentada no contexto da bacia.

O método ISA_GHT (Figura 5.3-12J e Figura 5.3-14J), mostrou grande correlação no traçado das feições NW no domínio do embasamento e NE no contexto da bacia. Já o método GHT_ISA (Figura 5.3-12I e Figura 5.3-14I) não obteve boa resposta.

Os filtros *theta* (Figura 5.3-12K e Figura 5.3-14K) e inclinação do gradiente horizontal total (IGHT-Figura 5.3-12L e Figura 5.3-14L) e corroboram as interpretações anteriores e auxiliam no refinamento do traçado das estruturas, obtendo uma melhor resposta para os campos continuados a 5.000 metros.

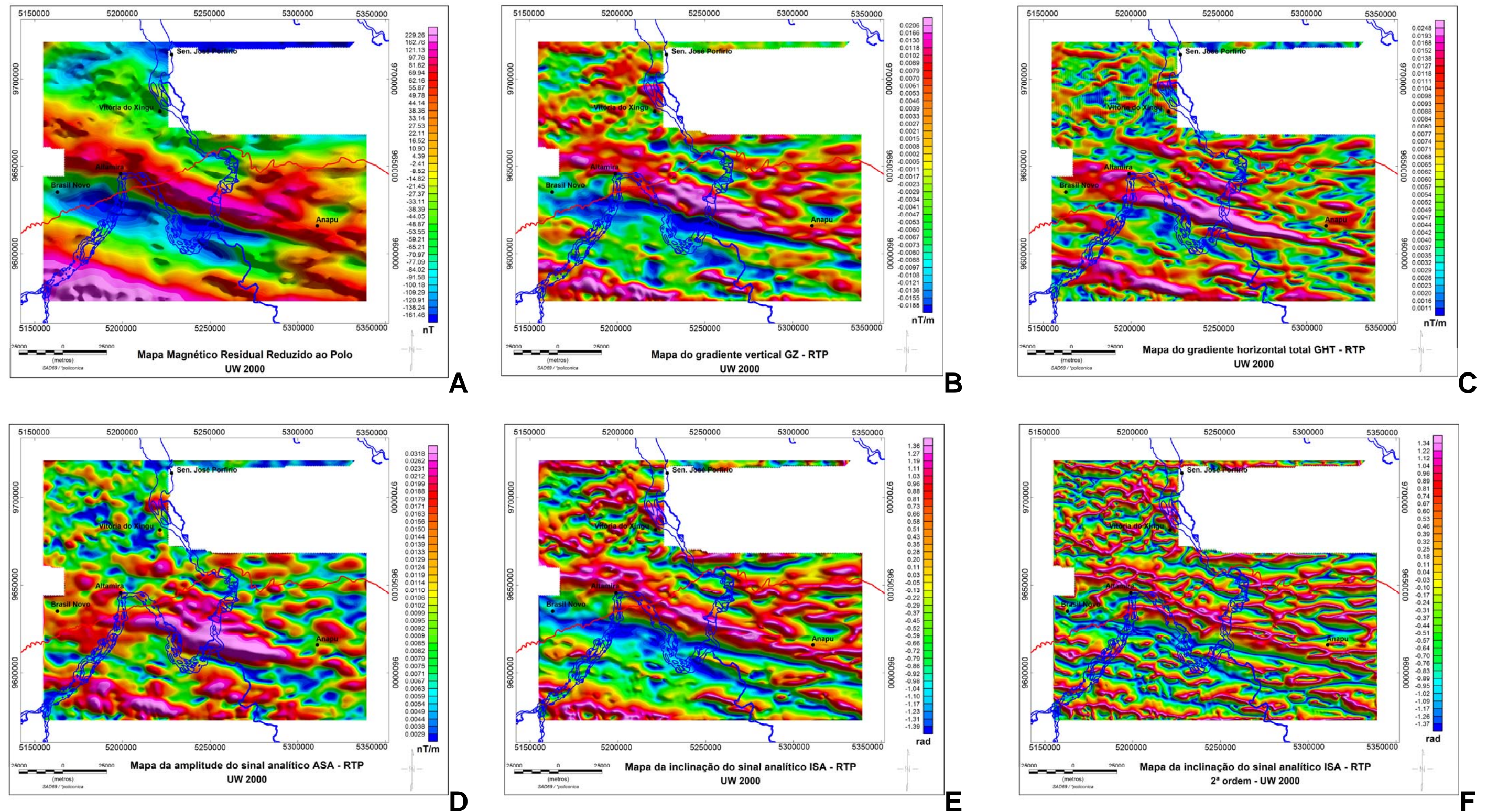


Figura 5.3-11: Mapas magnéticos da subárea Xingu: (A) mapa magnético residual RTP continuado para **2.000 metros**; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem.

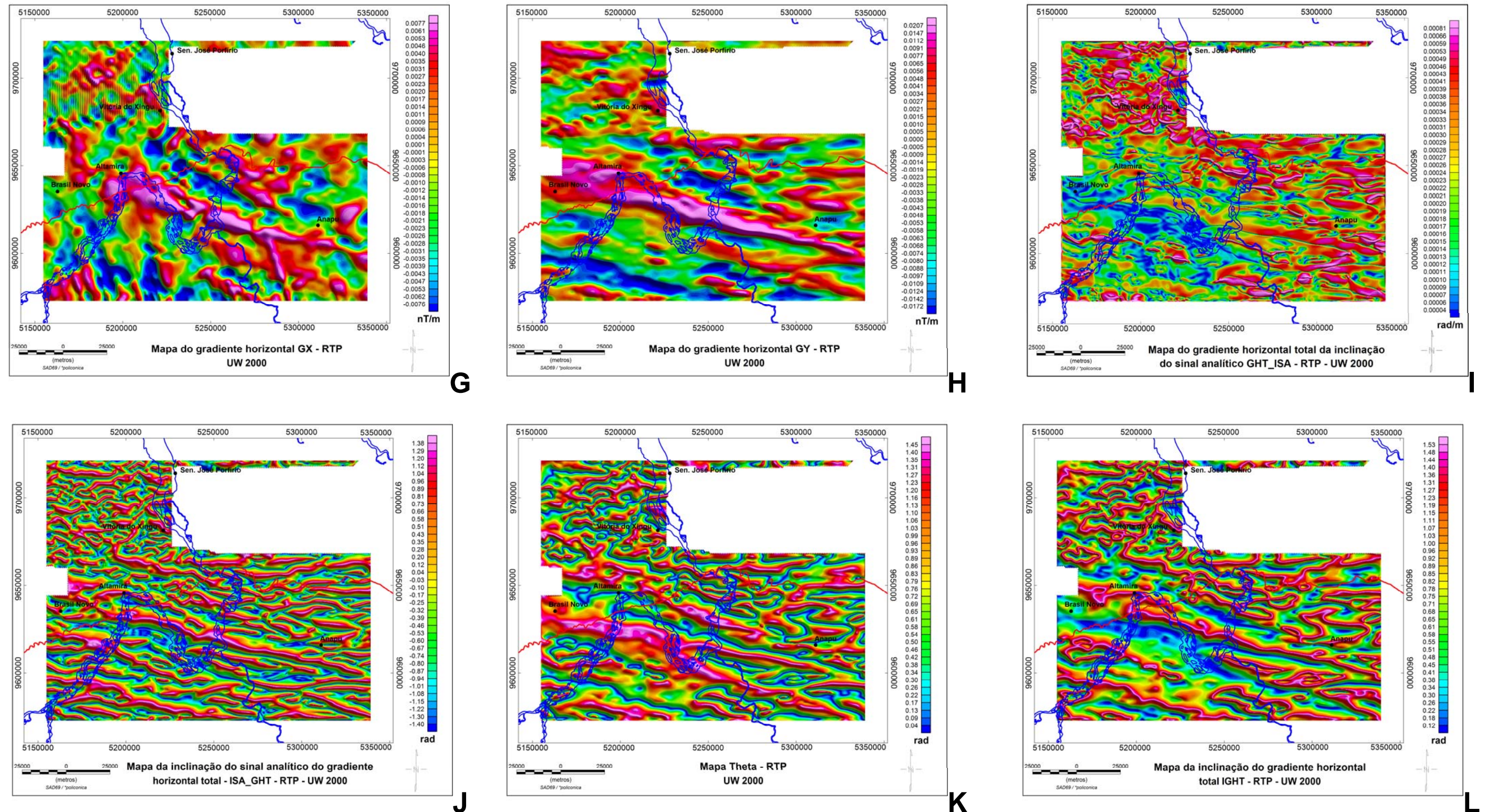


Figura 5.3-12: Mapas magnéticos da subárea Xingu: (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) *Theta map* e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total.

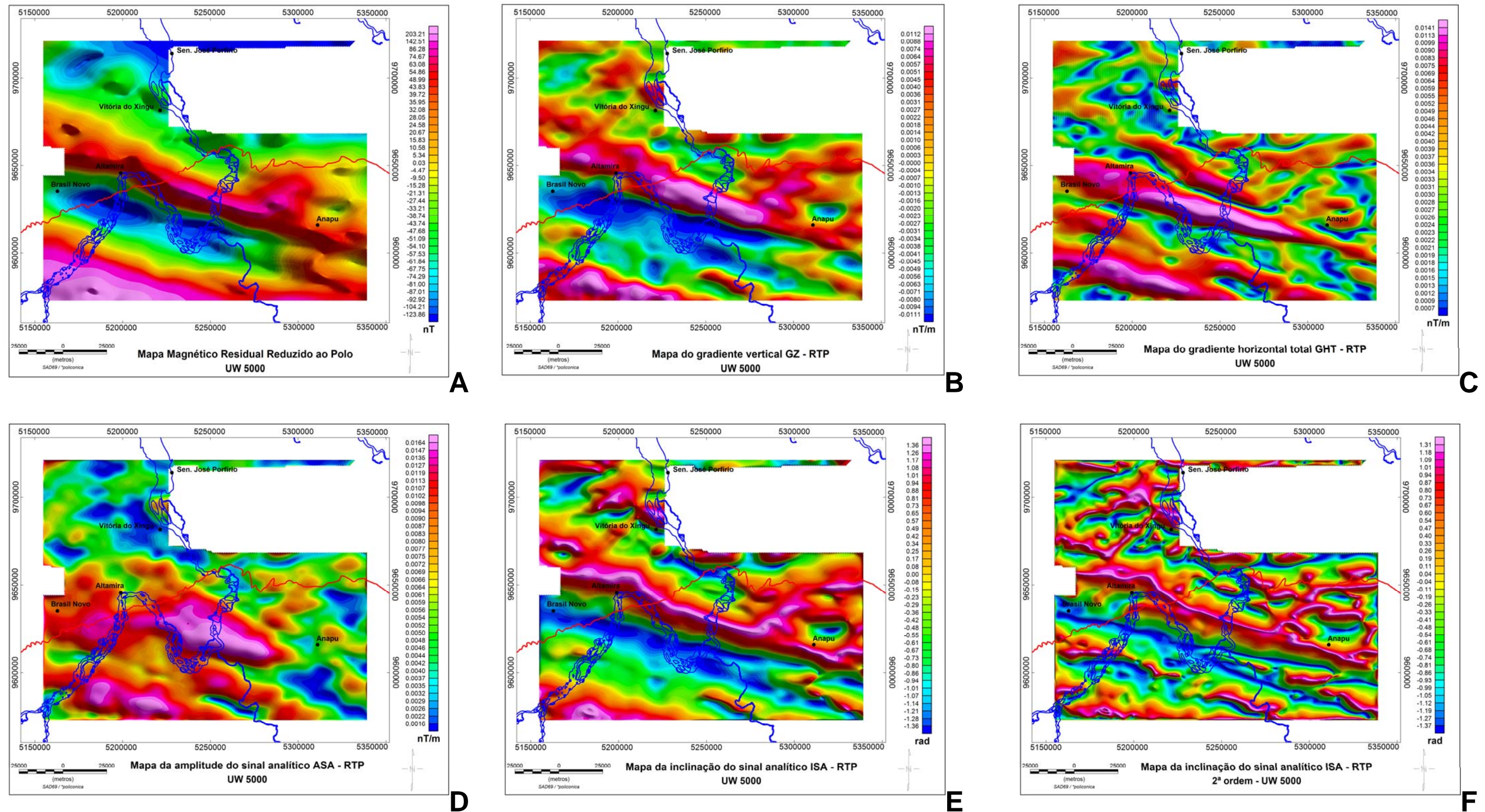


Figura 5.3-13: Mapas magnéticos da subárea Xingu: (A) mapa magnético residual RTP continuado para **5.000 metros**; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem.

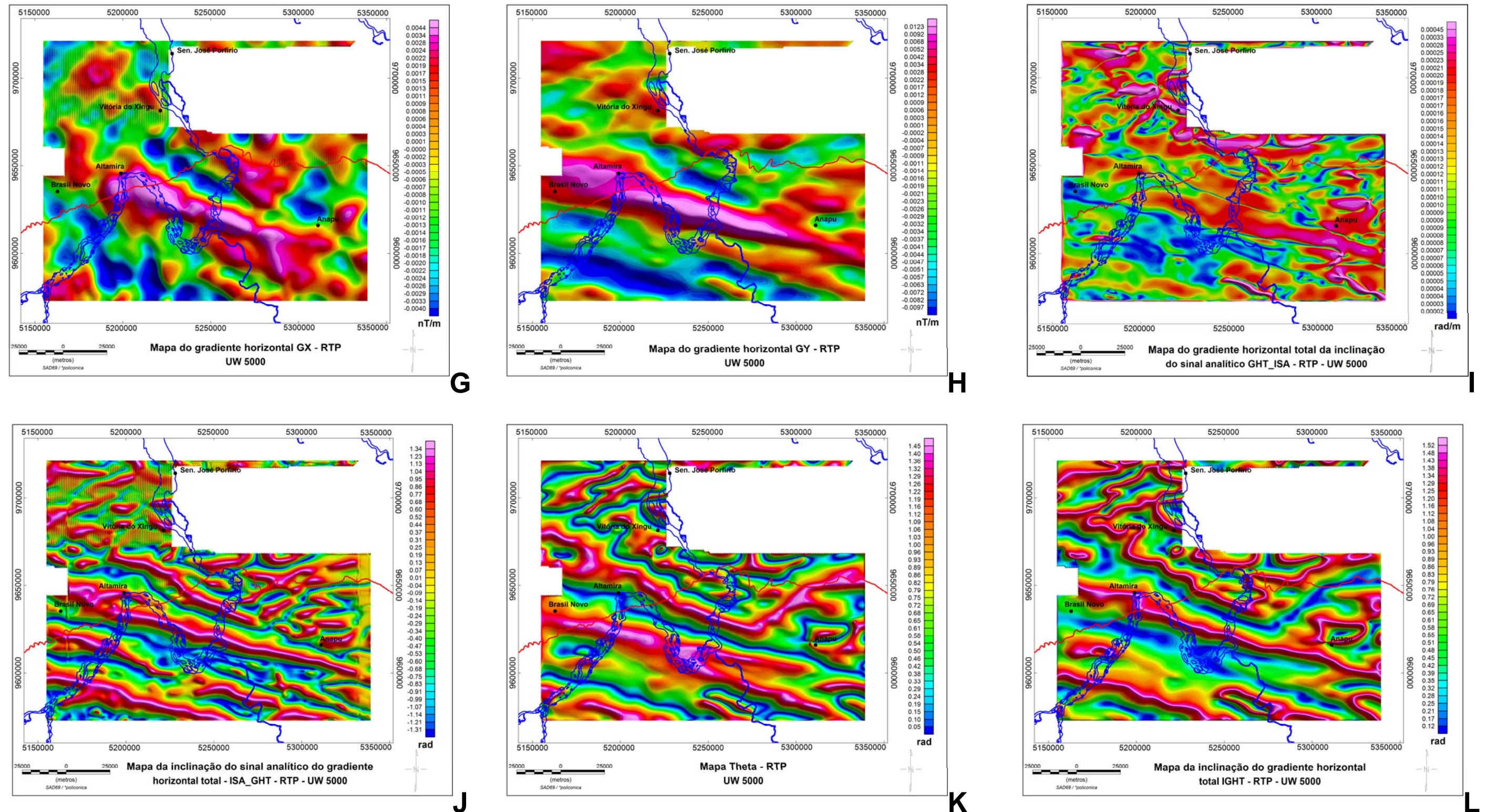


Figura 5.3-14: Mapas magnéticos da subárea Xingu: (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) *Theta map* e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total.

A análise conjunta dos lineamentos geofísicos derivados dos filtros de realce permitiu elaborar um mapa final de interpretação qualitativa onde as principais fontes anômalas para a subárea são representadas (Figura 5.3-15). A partir deste mapa foram elaborados diagramas de frequência e comprimento dos lineamentos geofísicos que permitem visualizar direções preferenciais N60-80W e N60-70E para a frequência dos lineamentos, enquanto para o comprimento os lineamentos se dispõem na direção N60-80W (Figura 5.3-16).

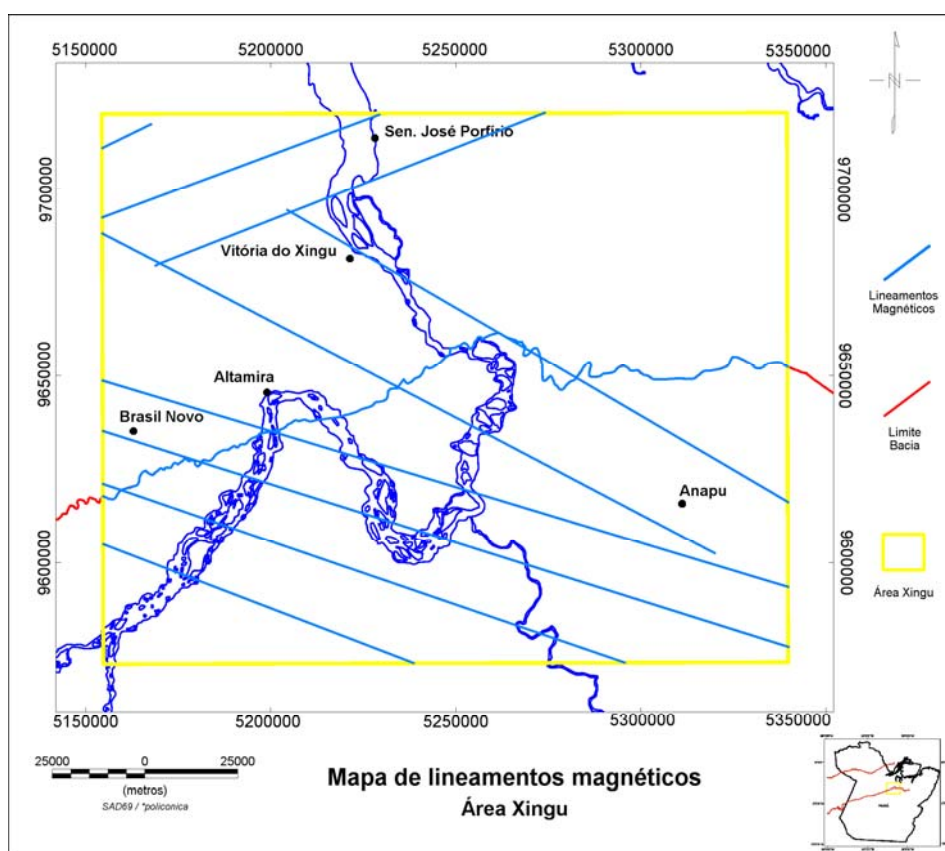


Figura 5.3-15: Mapa de lineamentos magnéticos da subárea Xingu.

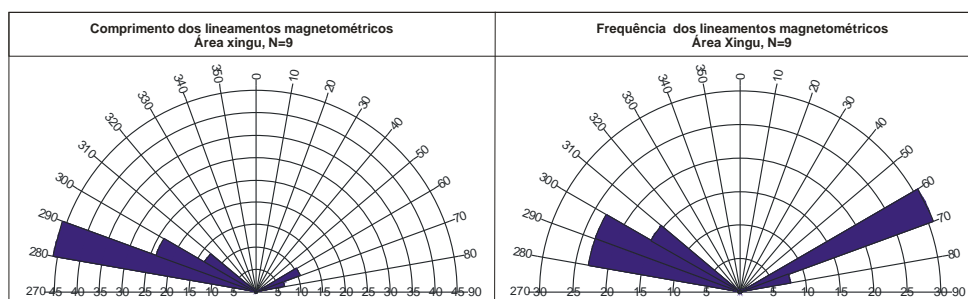


Figura 5.3-16: Diagramas de rosetas de comprimento (esquerda) e frequência (direita) acumulados dos lineamentos geofísicos da subárea Xingu.

5.3.6.2 Interpretação semi-quantitativa

Na análise semi-quantitativa foram empregados métodos estatísticos de obtenção de profundidades de fontes magnéticas: o espectro de potência radial e a deconvolução de Euler.

Na Figura 5.3-17 está representado o espectro de potência para a subárea de estudo, gerado a partir do mapa magnético residual, o qual apresenta o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y. Também é apresentada nesta figura a profundidade estimada para cada número de onda correspondente.

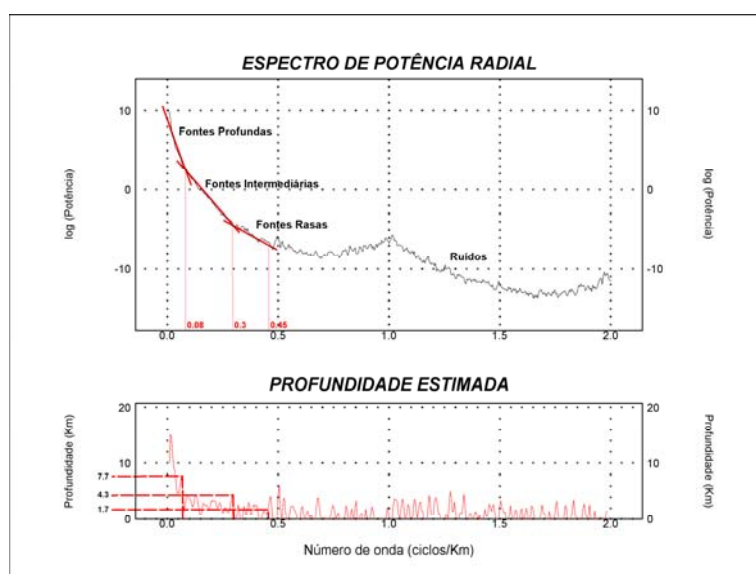


Figura 5.3-17: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual.

De acordo com a Figura 5.3-17 são discriminadas três partições marcadas pelas mudanças no declive da função espectral, as quais correspondem às profundidades das fontes, que são:

- fontes profundas: apresentam comprimento de onda maior que 12,5 km e profundidades médias entre 7,7 a 14 km;
- fontes intermediárias: discriminadas entre os comprimentos de onda de 12,5 km e 3,5 km, representando profundidades médias das fontes de 4,3 a 7,7 km;

- fontes rasas + ruídos: na última partição do espectro estão presentes as fontes correspondentes a corpos rasos e ruídos, os quais apresentam comprimentos de onda de 3,5 a 2,2 km e profundidades médias de 1,7 a 4,3 km, apesar de estarem relacionadas a profundidades variadas devido aos ruídos.

O método de deconvolução de Euler foi aplicado sobre os dados o campo magnético residual da subárea de estudo, para os modelos dique e contato, como mostram a Figura 5.3-18 e a Figura 5.3-19, respectivamente. Sobrepostos as soluções geradas são apresentados os lineamentos magnéticos obtidos a partir da interpretação qualitativa.

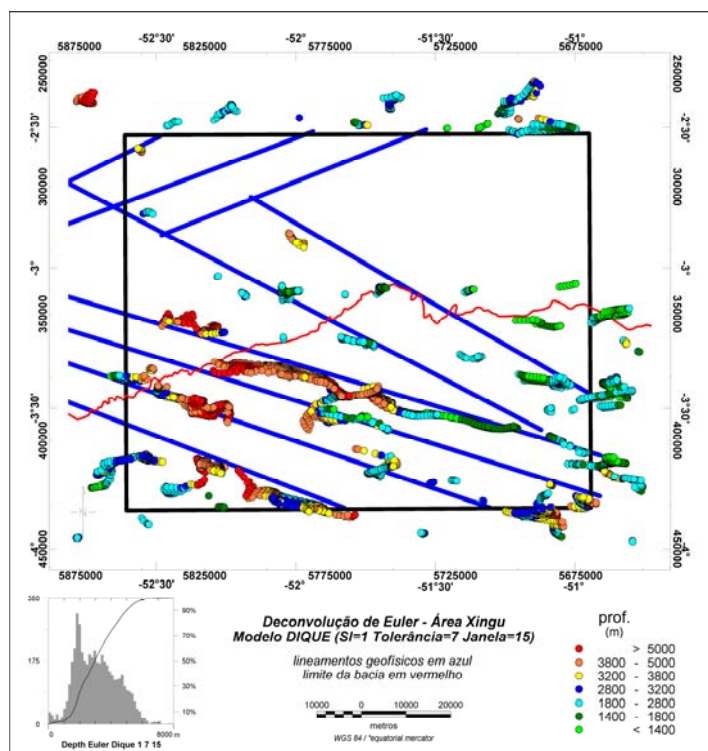


Figura 5.3-18: Mapa das soluções de Euler da subárea Xingu para o modelo dique.

Para o modelo dique, de acordo com o histograma gerado, foram obtidas soluções de profundidades que variam de 1.400 a <5.000m divididas em classes e cores para visualização. As soluções representadas são lineares, paralelas ao *trend* NW, corroborando o traçado dos lineamentos geofísicos, com profundidades compatíveis ao contexto do embasamento.

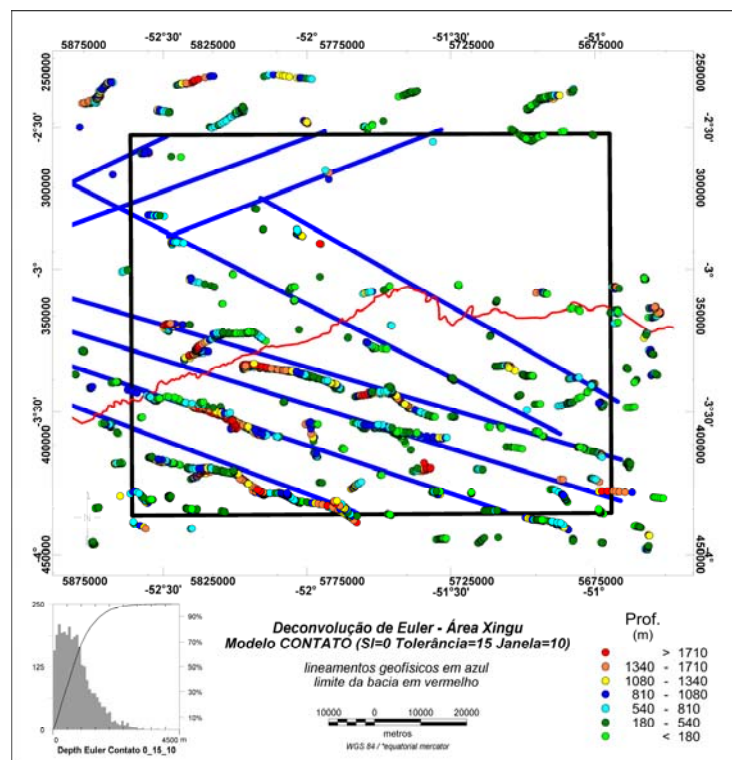


Figura 5.3-19: Mapa das soluções de Euler da subárea Xingu para o modelo contato.

No modelo contato a resposta observada é muito semelhante ao modelo anterior sendo geradas estruturas com profundidades menores, entre 180 e 1.700 metros. As profundidades observadas neste modelo realçam os contatos de estruturas no contexto do embasamento da Bacia do Amazonas.

5.3.6.3 Integração dos dados geofísico-estruturais

A análise preliminar das estruturas rúpteis observadas a partir de imagens de sensores remotos (PERICO, 2009), sobrepostas aos mapas magnéticos possibilitaram esboçar uma correlação entre as estruturas superficiais e de sub-superfície.

Ao comparar os lineamentos geofísicos aos lineamentos de Perico (2009) (Figura 5.3-20) observou-se que no embasamento, as estruturas têm direções NW preferenciais e NE subordinadas, sendo contínuas e espaçadas. Na Bacia do Amazonas, as estruturas exibem direções NE, sendo pouco contínuas e interrompidas.

Com base na coincidência ou proximidade das direções principais dos lineamentos, foram estabelecidas faixas estruturais (Figura 5.3-21). Cabe salientar a ausência de levantamentos magnéticos na porção NE da subárea.

O mapa residual RTP mostra duas anomalias magnéticas positivas de grande continuidade na porção Sul e Central da subárea (domínio magnético) que, comparadas ao mapa geológico da CPRM (2008), denotam relação com rochas do domínio do embasamento, como por exemplo, os corpos da suíte intrusiva Arapari e Charnoquito Bacajaí.

Os lineamentos obtidos a partir dos filtros do gradiente horizontal total (GHT) e da inclinação do sinal analítico (ISA) são correspondentes aos de interpretação de imagens SRTM. A subárea Xingu apresenta um forte domínio das estruturas NW do embasamento que cortam a bacia.

A subárea Xingu apresenta um forte domínio das estruturas NW do embasamento que cortam a bacia, sendo estas subparalelas às grandes estruturas propostas na literatura (e.g. REZENDE & BRITO, 1973; CORDANI, 1984; HASUI *et al.*, 1984, WANDERLEY FILHO, 1991 e VASQUEZ, 2008). Secundariamente, tendências NE são assinaladas no domínio da bacia.

O padrão NW reconhecido no embasamento pode corresponder tanto a estruturas rúpteis (e.g. zonas de falhas, juntas) quanto dúcteis (intercalações de unidades geológicas) descrito por Vasquez *et al.* (2005) e Perico (2009).

Os diagramas de roseta da Figura 5.3-8 mostram que as direções NW, predominantes, são comuns (frequência e comprimento) para ambos os conjuntos de lineamentos. Apesar da pouca representatividade das tendências NE, a frequência dos lineamentos magnéticos é equivalente a direção NW.

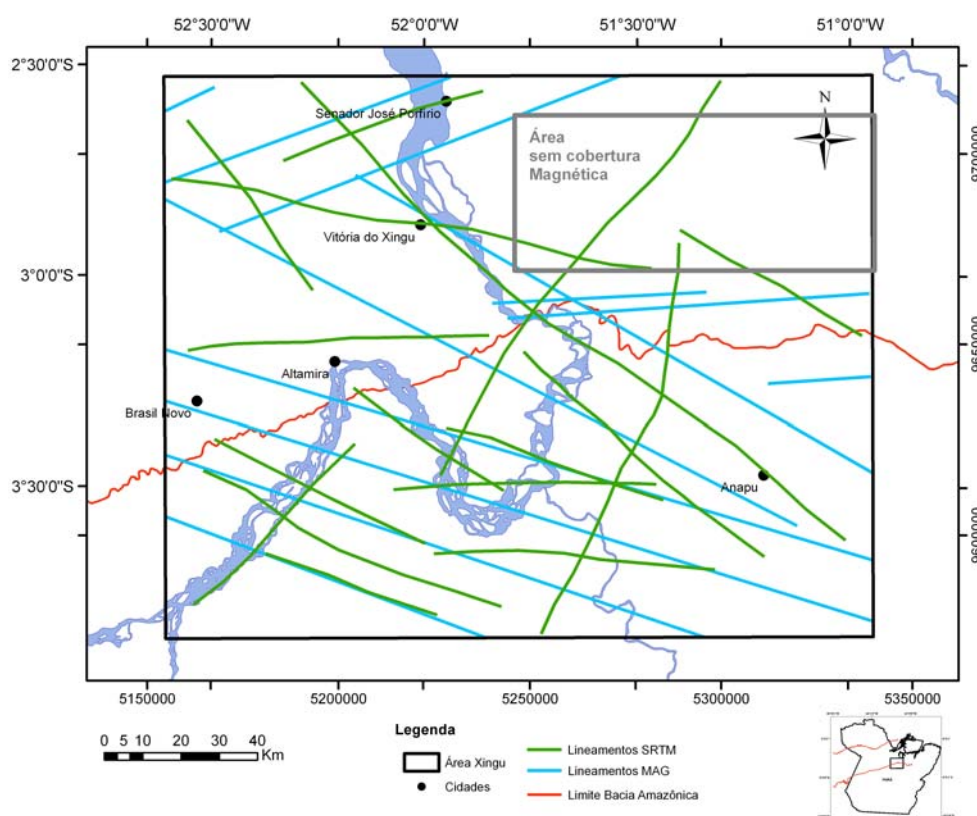


Figura 5.3-20: Mapa dos lineamentos SRTM (verde) e magnéticos (azul) da subárea Xingu indicando o limite da Bacia do Amazonas (vermelho) e o rio Xingu (azul).

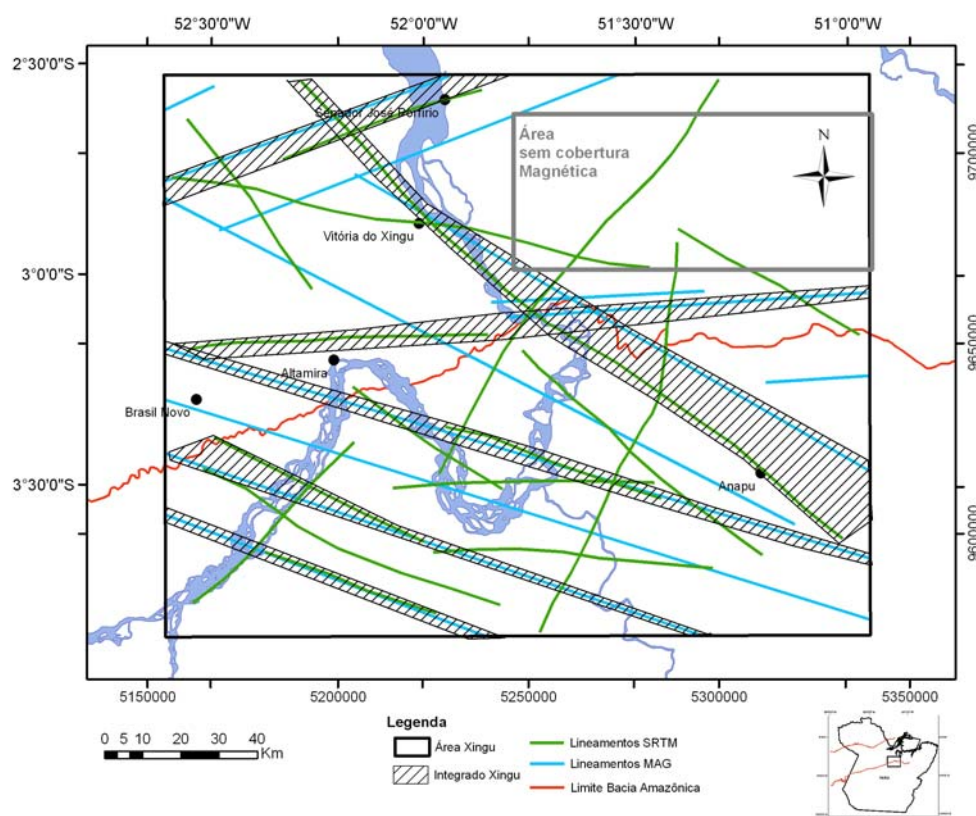


Figura 5.3-21: Mapa dos lineamentos SRTM (verde) e magnéticos (azul) da subárea Xingu indicando as faixas estruturais (hachuras cinza), o limite da Bacia do Amazonas (vermelho) e o rio Xingu (azul).

5.3.7 Discussão

Na análise qualitativa as principais estruturas determinadas através do mapa magnético residual e suas continuações para 2.000 e 5.000m, associados aos métodos de realce de anomalias, possuem direções preferenciais N60-80W e subordinadas N60-70E.

A integração geofísica-estrutural realizada com base nos lineamentos geofísicos e nos propostos por Perico (2009) e pela literatura, apresentou uma concordância importante nas direções preferenciais e secundárias, o que permitiu verificar que as estruturas NW são presentes no embasamento e por vezes adentram a bacia, enquanto as tendências NE se vinculam preferencialmente a estruturas presentes na Bacia do Amazonas.

A análise feita a partir do espectro de potência radial mostrou fontes profundas com estruturas de direções preferenciais NW e profundidades de 7,7 a 14 km; como também fontes intermediárias NW com profundidades de 4,3 a 7,4km.

Os principais resultados da análise semi-quantitativa através da deconvolução de Euler tanto para o modelo dique quanto para o modelo contato foi a presença de soluções lineares de direção NW as quais representam o *trend* do embasamento observado em superfície e qualitativamente pelos lineamentos geofísicos, com profundidades que variam de 1.400 a 5.000 metros.

5.4 SUBÁREA MONTE ALEGRE

5.4.1 Localização

Parte integrante do município de Monte Alegre, a subárea homônima, com cerca de 30.000 km², localiza-se no Estado do Pará, na porção Norte do rio Amazonas, a aproximadamente 100 km de Santarém (Figura 5.4-1), entre as coordenadas geográficas 54°55' e 52°46' de longitude Oeste e 1°00' e 2°08' de latitude Sul.

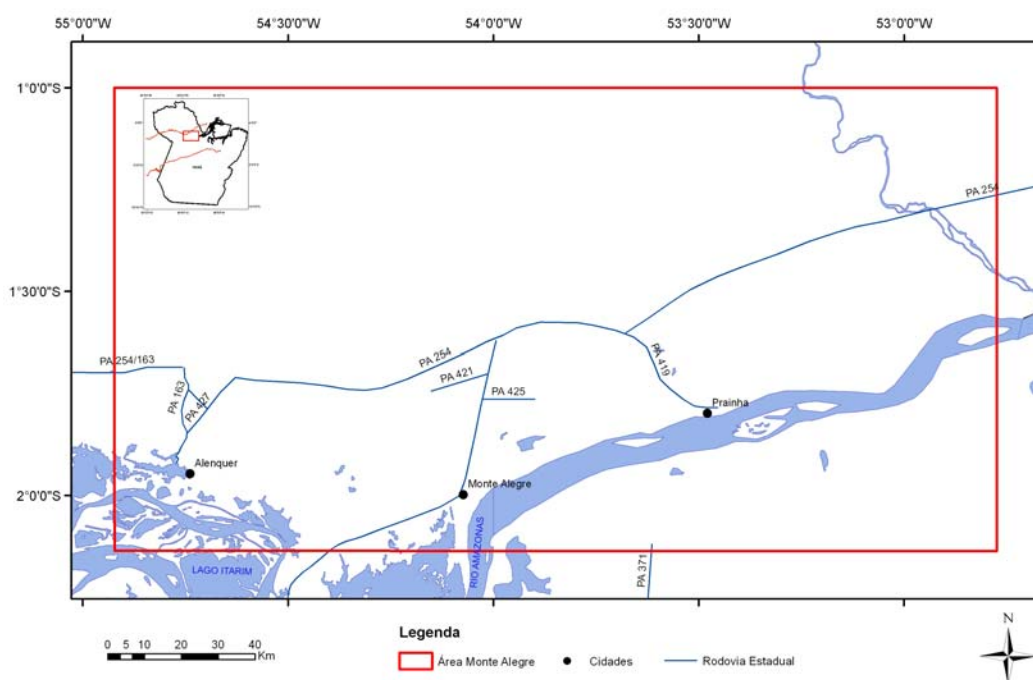


Figura 5.4-1: Localização e acesso à subárea de Monte Alegre estado do Pará.

O acesso à região pode ser realizado por vias aérea, terrestre/fluvial e fluvial. A cidade de Monte Alegre dispõe de um aeroporto que comporta aviões de pequeno e médio porte. A opção fluvial de transporte de passageiros e cargas é feita a partir de terminais hidroviários localizados ao longo do rio Amazonas. A malha rodoviária instalada no município está representada por três rodovias estaduais, PA-254, PA-255, PA-423, responsáveis pela ligação de Monte Alegre com os municípios

vizinhos, além de várias estradas municipais e ramais diversos, que respondem pelas ligações intermunicipais.

5.4.2 Material

De acordo com o Capítulo 4, a base dos materiais utilizados foi:

- Mapa geológico da CPRM na escala 1:1.000.000 (Figura 5.4-2);
- Imagens de SRTM com resolução de 90 metros, obtidas no site da USGS (Figura 5.4-3);
- Mapas de lineamentos estruturais em escala 1:800.000 e 1:200.000 obtidos por Figueira (2009) (Figura 5.4-4 e Figura 5.4-5);
- Mapa magnético residual CPRM (2002) (Figura 5.4-6);
- Mapa gravimétrico Bouguer (Figura 5.4-7).

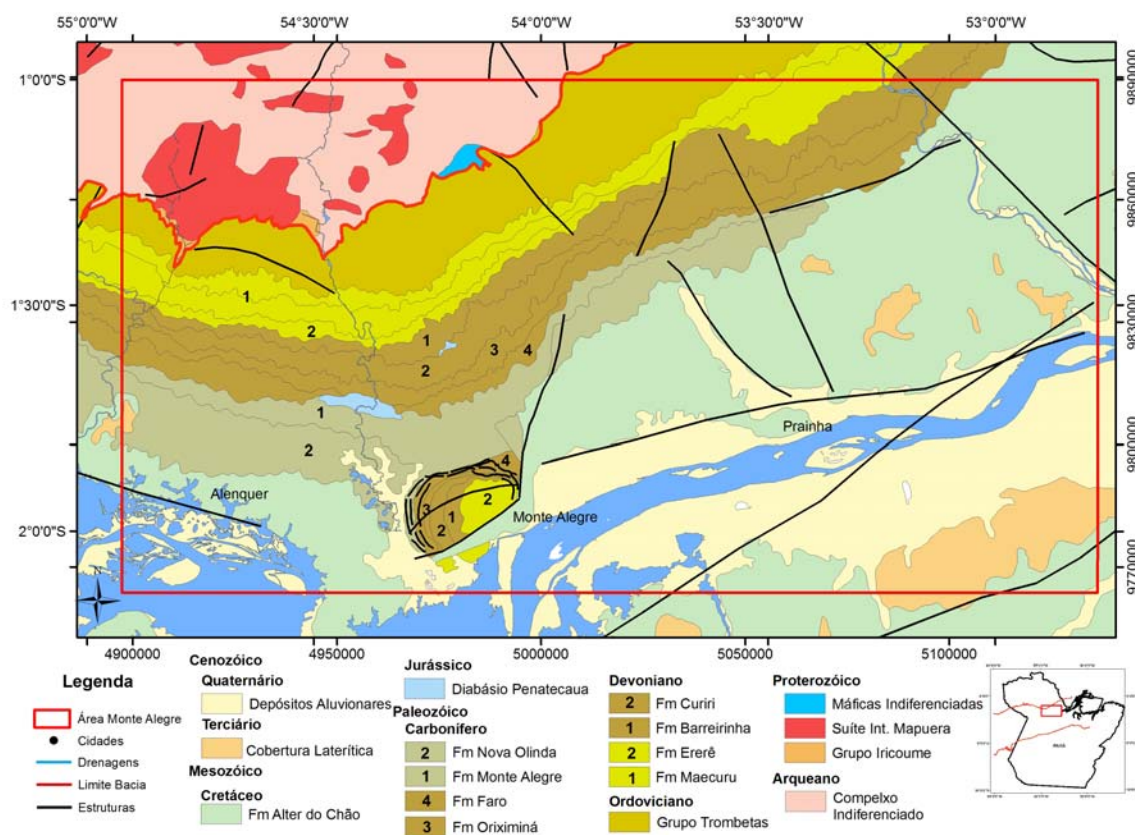


Figura 5.4-2: Mapa geológico da subárea de Monte Alegre (CPRM, 2008).

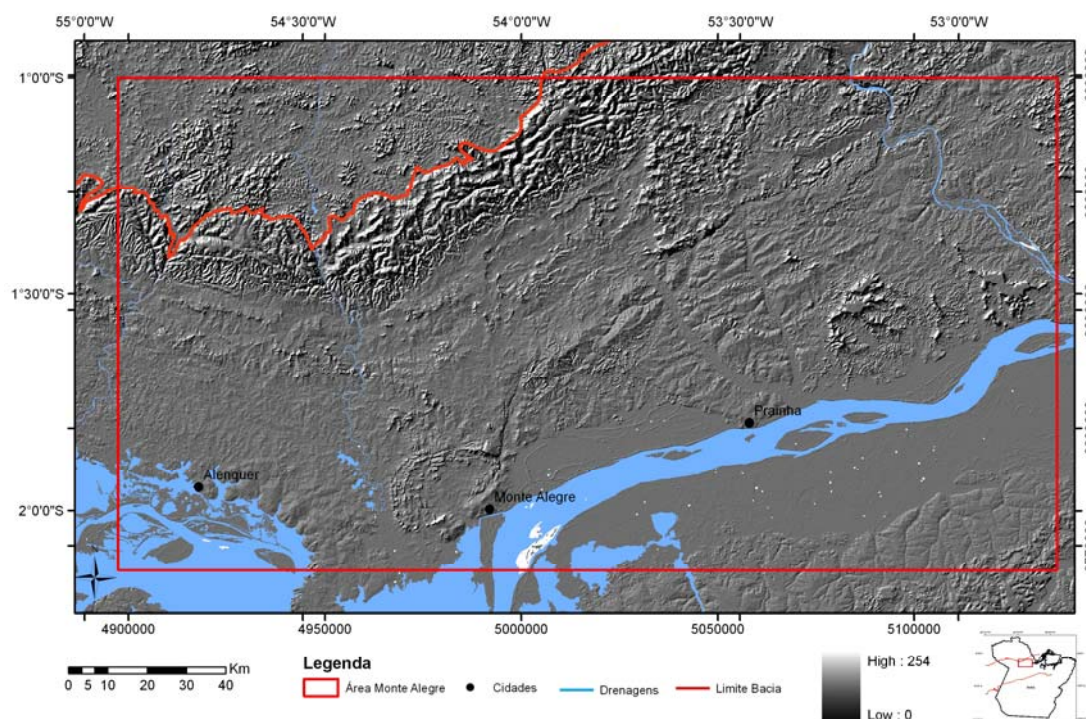


Figura 5.4-3: Imagem SRTM com pseudo-iluminação de 45°.

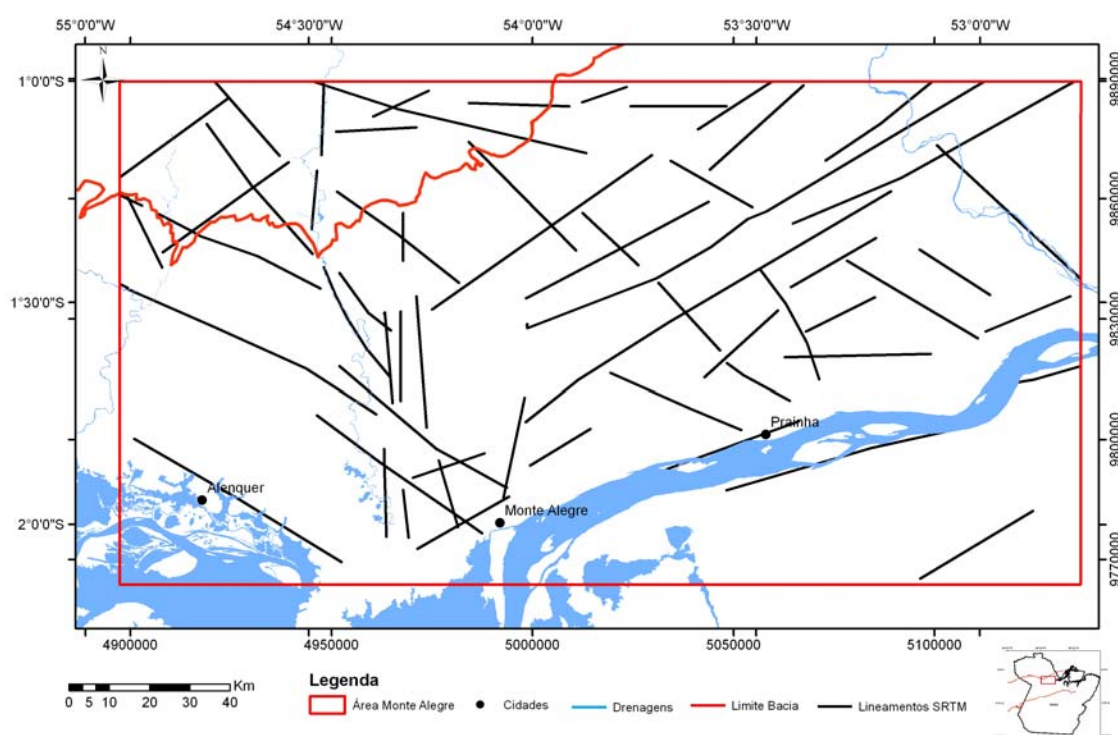


Figura 5.4-4: Lineamentos interpretados em escala 1:800.000. Fonte: Figueira (2009).

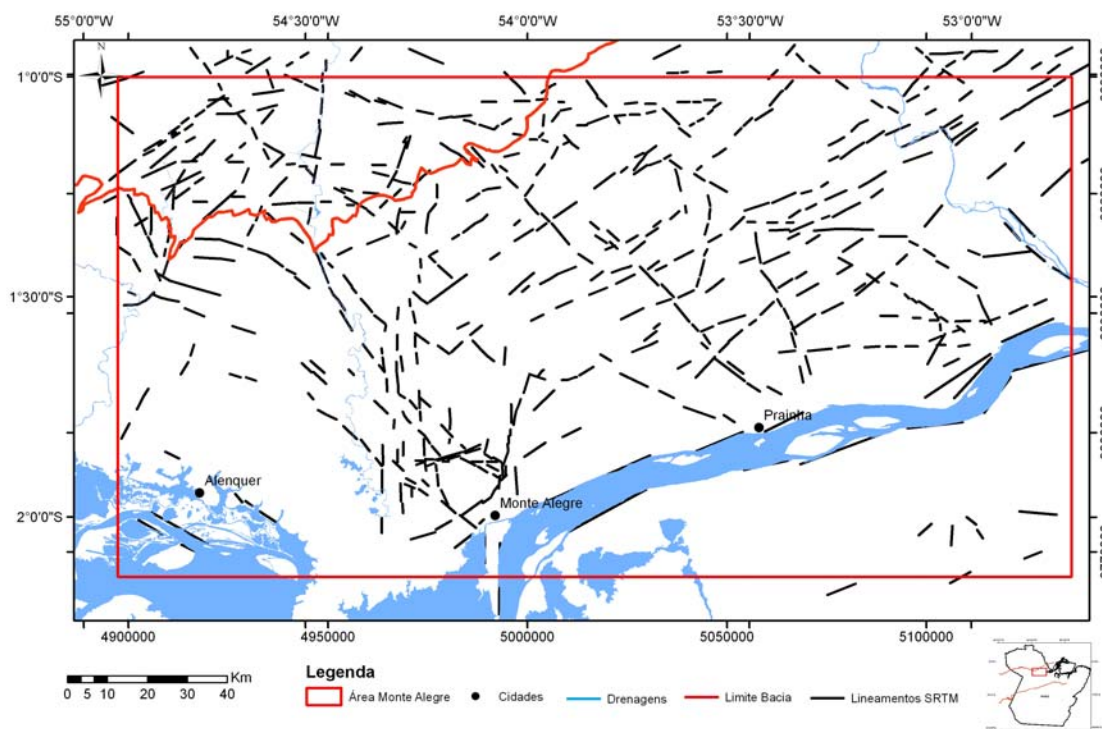


Figura 5.4-5: Lineamentos interpretados em escala 1:200.000. Fonte: Figueira (2009).

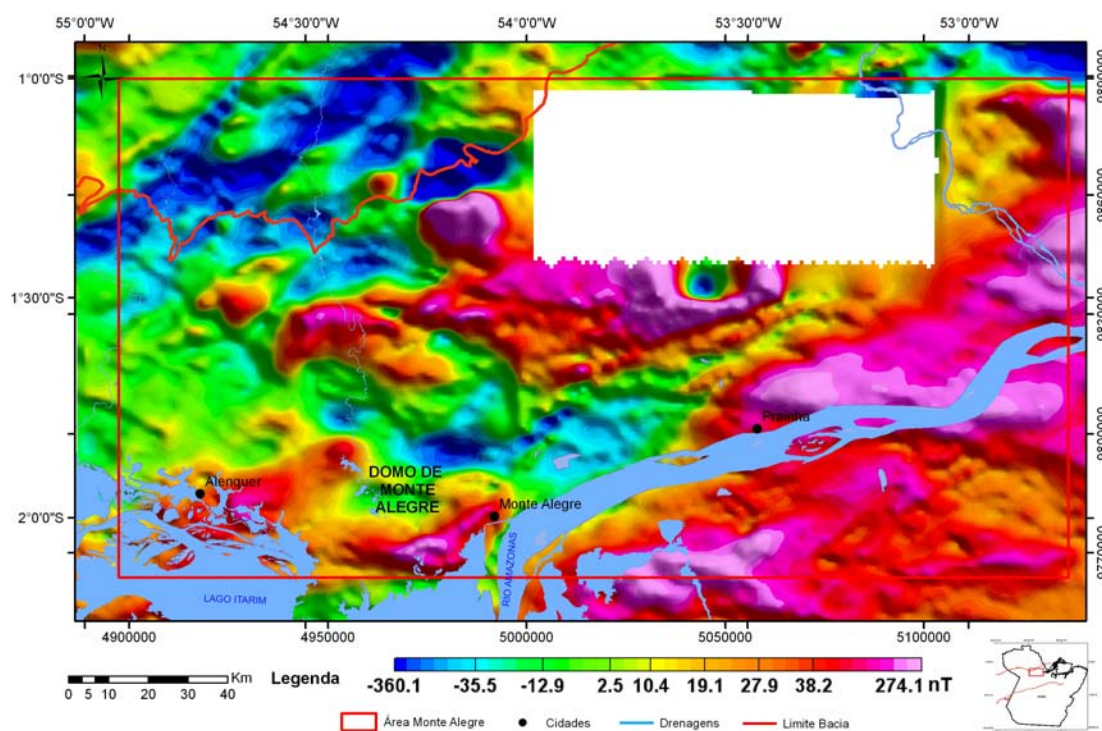


Figura 5.4-6: Mapa magnético residual da subárea Monte Alegre. Limite da Bacia do Amazonas em vermelho.

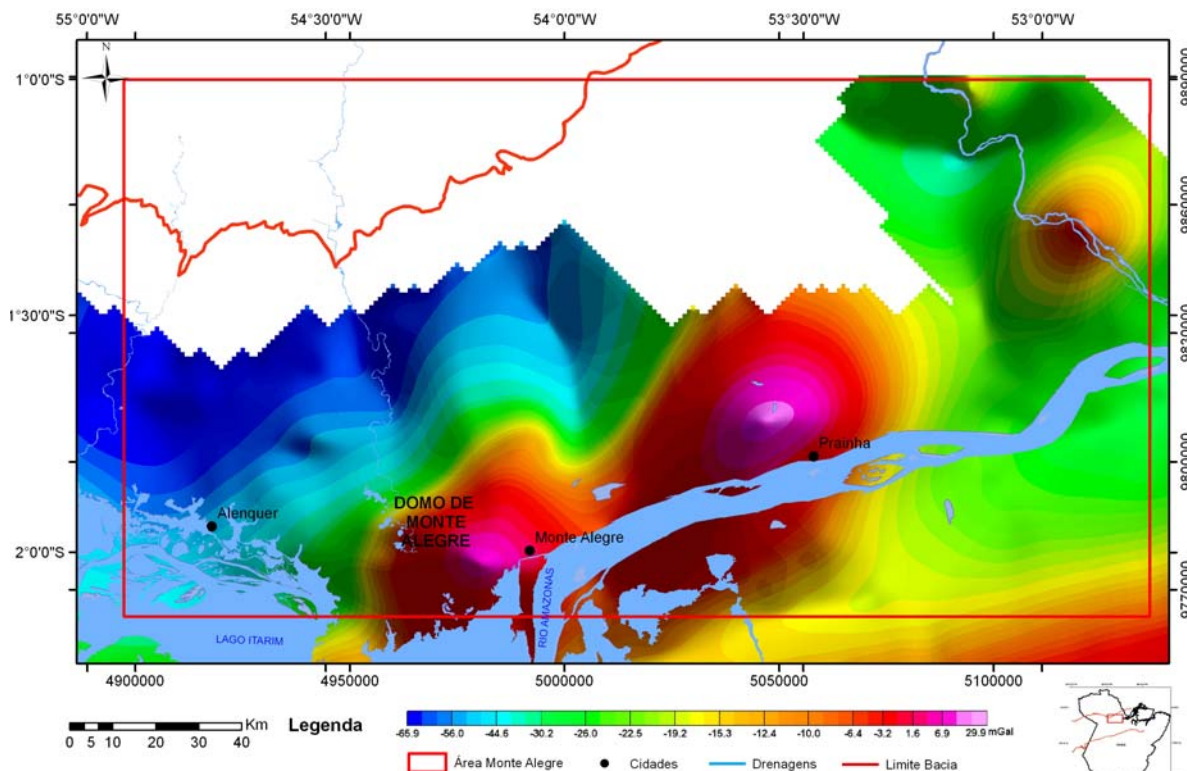


Figura 5.4-7: Mapa gravimétrico Bouguer da subárea Monte Alegre. Limite da Bacia do Amazonas em vermelho.

5.4.3 Geologia da subárea Monte Alegre

A região de Monte Alegre está situada na margem Norte do rio Amazonas onde afloram rochas fanerozóicas da Bacia do Amazonas, rochas proterozóicas e arqueanas do Escudo das Guianas.

As rochas proterozóicas correspondentes ao embasamento da Bacia do Amazonas e na subárea em questão são representadas pelo Domínio Erepecuru-Trombetas, Grupo Iricoumé; Suíte Intrusiva Mapuera, e Complexo Alcalino-Ultramáfico-Carbonatítico Indiferenciado (CPRM, 2008)

No Estado do Pará, a Norte do rio Amazonas, mais precisamente no domínio situado entre os rios Trombetas e Purus, encontra-se uma área cujo conhecimento geológico é incipiente, designado Domínio Erepecuru-Trombetas, de acordo com Vasquez *et al.* (2008). Segundo os autores, as unidades litológicas deste setor, em grande parte individualizadas por meio da análise de sensores remotos, são

representadas por rochas do embasamento arqueano-paleoproterozóico, por rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e por granitóides da Suíte Intrusiva Mapuera.

Do ponto de vista cronoestratigráfico, a descrição das unidades geológicas de idade fanerozóicas, pertencentes à Bacia do Amazonas e aflorantes na subárea seguiram a caracterização proposta por Cunha *et al.* (1994), onde a unidade mais antiga é representada por arenitos esbranquiçados, friáveis da Formação Manacapuru, Grupo Trombetas.

O Grupo Trombetas apresenta um relevo pronunciado, na forma de cuevas e platôs, onde se destaca uma rede de drenagem bem encaixada e espaçada, com vales profundos e de perfil em V, compatíveis com litologias predominantemente arenosas.

O Grupo Urupadi é dividido nas formações Maecuru e Ererê. Litologicamente, a Formação Maecuru, segundo Pastana (1999), apresenta na porção basal arenitos brancos a cinza claros, micáceos, de granulometria fina a média, bem estratificados; na porção superior, ocorrem arenitos finos, fossilíferos, com intercalações de folhelhos cinza escuros. Na Formação Ererê predominam intercalações de siltitos, arenitos e folhelhos, no interior do Domo de Monte Alegre, é representada por siltitos cinza azulados, horizontalizados, estratificados em bancos, extremamente compactos, fraturados com delgadas intercalações de folhelhos cinza a amarelado (FIGUEIRA, 2009).

O Grupo Curuá é composto pelas formações Barreirinha, Curiri, Oriximiná e Faro. Na Formação Barreirinha predominam folhelhos negros, depositados durante a transgressão global, bem laminados, carbonosos, micáceos, piritosos e radioativos.

A Formação Curiri, foi proposta por Lange em 1967 é caracterizada por Pastana *et al.* (1978), como possuindo intercalações e interlaminas de folhelhos e siltitos, com arenitos subordinados, destacando a presença marcante de microfósseis típicos. Os folhelhos são de coloração negra a cinza ou esverdeada.

Pastana (1999) identificou na Formação Oriximiná arenitos, siltitos e folhelhos. Na porção inferior da unidade predominam arenitos finos a médios,

brancos a avermelhados, maciços, micáceos, às vezes com intercalações de siltitos e folhelhos. Na parte superior predominam rochas de granulação mais fina, sendo freqüentes as intercalações de folhelhos e siltitos.

A Formação Faro ocorre na porção periférica do Domo de Monte Alegre, flanco norte da Bacia do Amazonas. Caracteriza-se por arenitos finos a grossos, além de folhelhos, siltitos e folhelhos sílticos. De acordo com Pastana *et al.* (1978) a porção inferior da Formação Faro é essencialmente arenosa, predominando arenitos quartzosos de granulometria fina, cinza a esverdeados, micáceos e, subordinadamente, arenitos grossos, ferruginosos, além de arenitos avermelhados, micáceos, finos, friáveis. Na porção superior, predominam rochas de granulometria mais fina, representadas por siltitos bem laminados, contendo intercalações de folhelho cinza escuro a negro, além de folhelhos sílticos com estrutura *flaser*.

O Grupo Tapajós é composto pelas formações Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda. A Formação Monte Alegre abrange ampla área de exposição subparalela as unidades da borda da Bacia do Amazonas, estendendo-se continuamente para o Sul, contornando grande parte da estrutura dômica. Pastana *et al.* (1978) caracterizam esta unidade como arenitos ortoquartzíticos, médios a grossos, por vezes conglomeráticos, friáveis, localmente com marcas de ondas; raramente apresentam intercalações de folhelho esverdeado a amarelado. Uma característica peculiar da Formação Monte Alegre é a presença de arenitos com formas erosivas muito particulares, semelhantes a “cascos de tartaruga”.

Devido a similaridades litológicas, estruturais e morfológicas entre as formações Itaituba e Nova Olinda na região de Monte Alegre, Pastana *et al.* (1978) agruparam essas rochas em uma única unidade designada “Formações Itaituba/Nova Olinda”. Importantes jazidas de calcário ocorrem na unidade citada. Os autores descrevem os litotipos dessa unidade como sendo arenitos na porção inferior da seção, contendo intercalações de folhelhos, siltitos e, mais raramente, calcário. Ainda ocorrem na área rochas da Formação Alter do Chão.

5.4.4 Geologia estrutural da Bacia do Amazonas e do seu embasamento na subárea Monte Alegre

Em grande parte da subárea, no Domínio Erepecuru-Trombetas, as feições estruturais dúcteis de escala regional são relativamente pouco abundantes ou mesmo ausentes. No mapa geológico do Estado do Pará, recentemente publicado (VASQUEZ, 2008), são indicados lineamentos de direção WNW-ESE, interpretados como falhas dextrais. Igualmente, pode-se notar a presença de importantes lineamentos de direção NS e N-NE, concordantes às direções de muitos dos diques de diabásio, o que poderia sugerir algum controle da tectônica rúptil na colocação dos magmas básicos. Nos mapas de Araújo *et al.* (1976) são importantes as estruturas rúpteis regionais marcadas por lineamentos de direção NE e NW. Entre as estruturas de direção NE destacam-se as falhas Barreirinha, do Jangada, do Cachorro, da Cidade Velha, do Pitinga, além dos grábens do Capucapu e do Médio Mapuera e do alto do Cachorro. Dentre as falhas de direção NW, Araújo *et al.* (1976) destacam as falhas da Serra do Maicuru, do Cuminapanema, do Erepecuru, além do gráben do Jatapu.

Estruturas circulares, observadas em alguns mapas regionais (ARAÚJO *et al.*, 1976), revelam padrão dômico que parecem ter ligação com a ascensão de plútons. Segundo Lemos & Gaspar (2002), a intersecção das falhas de Barreirinha, de direção NE, e da Serra do Maicuru, de direção NW, que seriam zonas de fraqueza crustal (suturas), poderia criar condutos capazes de permitir a ascensão dos magmas alcalinos e carbonatíticos. Estes autores consideram que uma fase distensional teria controlado o desenvolvimento destas anisotropias estruturais e, ao mesmo tempo, propiciado a instalação da Bacia do Amazonas, há cerca de 612 Ma, idade esta estimada para o Complexo Alcalino-Ultramáfico-Carbonatítico de Maicuru.

5.4.5 Análise de lineamentos

Os trabalhos realizados na região de Monte Alegre por Figueira (2009) seguiram os mesmos procedimentos das demais subáreas estudadas. As imagens SRTM (Figura 5.4-3), com resolução de 90 metros, foram utilizadas como base para a identificação de estruturas no relevo com as pseudo-iluminações nos sentidos 0°, 45°, 90° e 315°, visando realçar as morfoestruturas e facilitar o reconhecimento dos lineamentos estruturais.

As principais feições retilíneas, negativas e positivas, são representadas por lineamentos com comprimentos de dezenas a centenas de quilômetros. Os lineamentos foram traçados primeiramente em escala 1:800.000, designados de primeira ordem, contínuos e com mais de 10 km, visando identificar as estruturas regionais. Para aprimorar a interpretação, lineamentos de igual ordem foram também traçados na escala 1:200.000.

A partir dos lineamentos, traçados por Figueira (2009), diagramas de rosetas de comprimento e frequência acumulados foram confeccionados nesta tese, utilizando o software *RockWorks* para análise geral das direções. A tendência preferencial dos lineamentos de maior comprimento é N50-60E, ocorrendo subordinadamente na direção N50-60W. Para a frequência, as direções preferenciais são N50-70E e N50-60W e NS secundárias, como mostra a Figura 5.4-8.

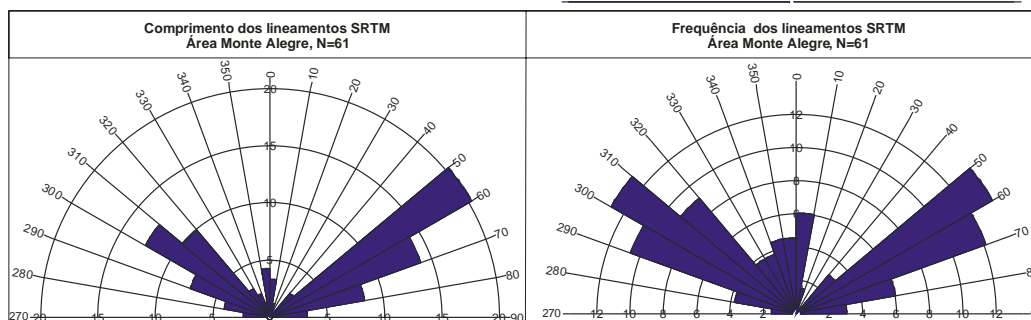


Figura 5.4-8: Diagramas de roseta para comprimento e frequência acumulados dos lineamentos estruturais da subárea Monte Alegre.

Figueira (2009) observou maior concentração da frequência e do comprimento dos lineamentos na direção NW nas porções Oeste e Norte da subárea, enquanto para a direção NE as maiores concentrações ocorrem nos tratos Norte e Nordeste. A presença de lineamentos de direção N-S com altos comprimentos e frequências, ocorre principalmente na região do Domo de Monte Alegre. Lineamentos de direção E-W, com maiores comprimentos e frequências, concentram-se na porção Norte.

No processo de reconhecimento dos padrões de drenagem, com enfoque no reconhecimento de estruturas anômalas indicativas de possíveis falhas e flexuras de camadas, foram identificadas por Figueira (2009) várias estruturas anelares e radiais, centrípetas e centrífugas, no Domo de Monte Alegre.

5.4.6 Arcabouço estrutural-magnético

5.4.6.1 Interpretação qualitativa

A análise do arcabouço estrutural-magnético da subárea Monte Alegre foi apoiada na série de aerolevantamentos do Brasil ao Milionésimo, elaborado pela CPRM (2002), cujos dados digitais são apresentados na forma de malha regular de 1.000x1.000 metros e continuados para uma altura média de voo de 1.000 metros (Figura 5.4-6). Para o processamento e interpretação qualitativa dos dados

magnéticos da subárea de estudo, fez-se uso do *software* Oasis Montaj v. 6.3 da Geosoft™.

Neste tópico são apresentados os mapas magnéticos da subárea reduzidos ao polo e derivados dos métodos de realce de anomalias descritos nos capítulos 2 e 3, os quais ensejaram elaborar um mapa preliminar de interpretação magnética qualitativa. Todos os mapas foram pseudo-iluminados na direção N45E, com a finalidade de melhorar a apresentação e realçar as estruturas de interesse.

A análise do mapa magnético residual RTP (Figura 5.4-9), apesar de indicar as principais tendências da subárea, exibe sinais de alta frequência espacial, reflexo de fontes rasas, os quais podem se transformar em ruídos, como resultado dos métodos de realce apresentados a seguir.

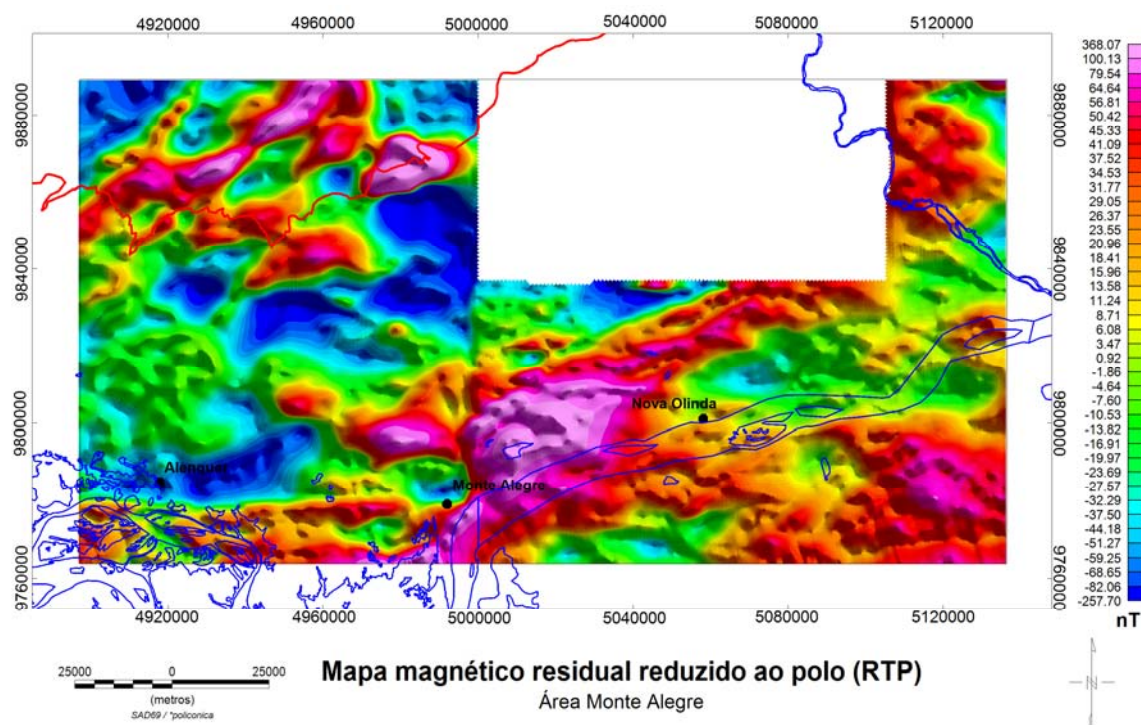


Figura 5.4-9: Mapa magnético residual da subárea Monte Alegre reduzido ao polo (RTP). Rio Amazonas (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

Para minimizar este problema, inicialmente os dados do mapa magnético residual foram submetidos à continuações ascendentes, para simular os resultados decorrentes nas altitudes de 2.000 e 5.000m (Figura 5.4-10), onde se observou a eliminação de grande parte dos sinais de alta frequência espacial do mapa residual

original (1.000m de altura), realçando as fontes anômalas profundas (maiores comprimentos de onda).

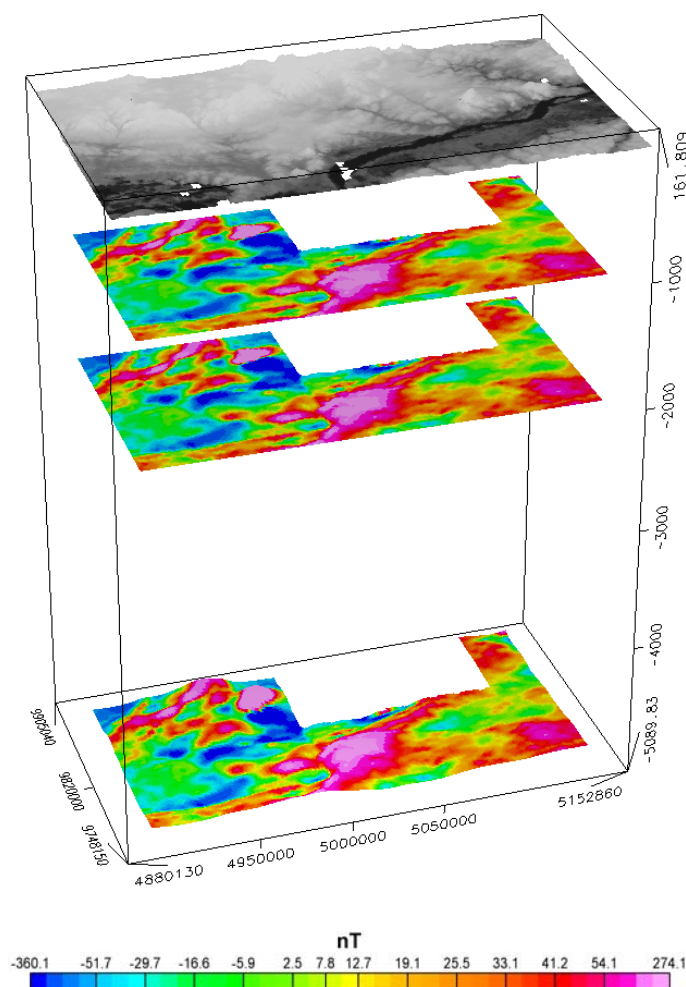


Figura 5.4-10: Bloco diagrama da subárea Monte Alegre com mapa SRTM, mapa magnético residual (1.000 metros), mapas continuados a 2.000 e 5.000 metros.

Porém, devido a qualidade do levantamento, após a aplicação da RTP aos dados magnéticos residuais, ficou ressaltada uma faixa Norte-Sul, na porção central da subárea, referente a divisão dos antigos levantamentos, esta feição permaneceu em todos os filtros de realce aplicados e foi desconsiderada na interpretação dos dados.

Outra verificação importante foi a inversão de polaridade magnética em duas anomalias circulares localizadas na porção noroeste da subárea, sugerindo a presença de magnetização remanescente em rochas do embasamento,

provavelmente associadas à Suíte Intrusiva Mapuera, representadas por estas anomalias.

Também, os mapas da subárea Monte Alegre mostram persistência de estruturas circulares em profundidade, principalmente na porção central da área, como também na porção Sudeste onde é visível fonte anômala.

A interpretação magnética qualitativa envolveu o traçado dos principais lineamentos geofísicos sobre os diversos mapas magnéticos derivados dos filtros de realce descritos no Capítulo 2, visualizados nos mosaicos da Figura 5.4-11 e Figura 5.4-12 (mapas gerados a partir do campo continuado para 2.000 metros) e nos mosaicos da Figura 5.4-13 e Figura 5.4-14 (mapas gerados a partir do campo continuado para 5.000 metros).

Julgou-se conveniente aplicar os filtros de realce sobre os campos continuados a 2.000 e 5.000 metros no intuito de realçar fontes intermediárias a profundas, como também, de anular e/ou atenuar a influência de fontes rasas e de ruídos.

A resposta apresentada para cada filtro, nos diferentes campos continuados foi analisada separadamente, de acordo com a característica de realce de cada método, seja ele detector de centros e/ou de bordas de anomalias magnéticas e, a partir da interpretação dos mesmos, foram traçados os lineamentos geofísicos.

Da mesma forma que para as demais subáreas estudadas, observou-se que os filtros aplicados sobre os mapas continuados para 5.000 m apresentam maior clareza de estruturas, realçando as fontes de maior profundidade e interesse na pesquisa. Quando se observam os mapas continuados a 2.000 m, principalmente quando aplicados os filtros de 2ª ordem (p. ex. ISA_GHT e GHT_ISA), nota-se uma mixagem de sinais, dificultando a interpretação dos lineamentos magnéticos.

Os mapas magnéticos residuais continuados, tanto para 2.000m quanto para 5.000m (Figura 5.4-11A e Figura 5.4-13A), mostram a preservação de *trends* de direção NE que atravessam toda a subárea, principalmente na sua porção Sudeste,

bem como estruturas circulares de grande importância relacionadas ao Domo de Monte Alegre e a rochas do embasamento.

O gradiente vertical (Gz - Figura 5.4-11B e Figura 5.4-13B) realçou as estruturas NE no contexto da bacia e na porção Noroeste da subárea, as quais podem se relacionar a rochas do embasamento.

O GHT (Figura 5.4-11C e Figura 5.4-13C) e ASA (Figura 5.4-11D e Figura 5.4-13D) realçaram as bordas das estruturas e localizaram os corpos, respectivamente, em conformidade com suas formulações, auxiliando na identificação da Suíte Intrusiva Mapuera, no contexto do embasamento. O *trend* NE permanece e é realçado por estes filtros atravessando o centro da área, e não mais a sua porção Sudeste, podendo estar vinculados a rochas do embasamento em profundidade, sob os sedimentos da bacia.

O filtro de inclinação do sinal analítico (ISA) de 1ª e 2ª ordem (Figura 5.4-11E,F e Figura 5.4-13E,F) foi útil no traçado de lineamentos geofísicos, pois homogeneizou os sinais derivados de estruturas em diferentes profundidades. Observou-se a presença do *trend* NE no contexto da bacia, evidenciado por altos magnéticos, bem como, um baixo magnético paralelo ao seu eixo deposicional, o qual ainda não havia sido tão bem ressaltado nos demais métodos.

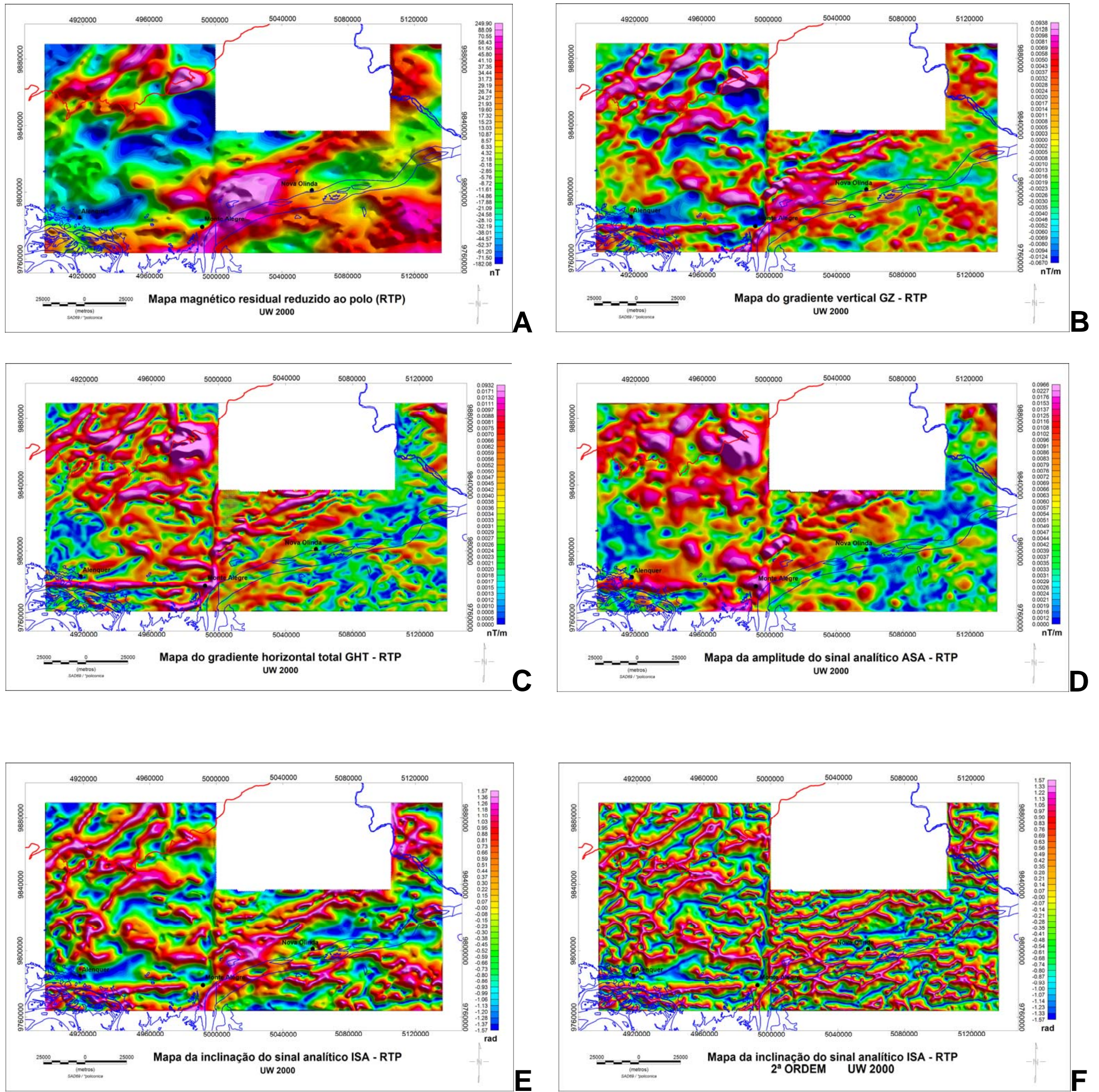
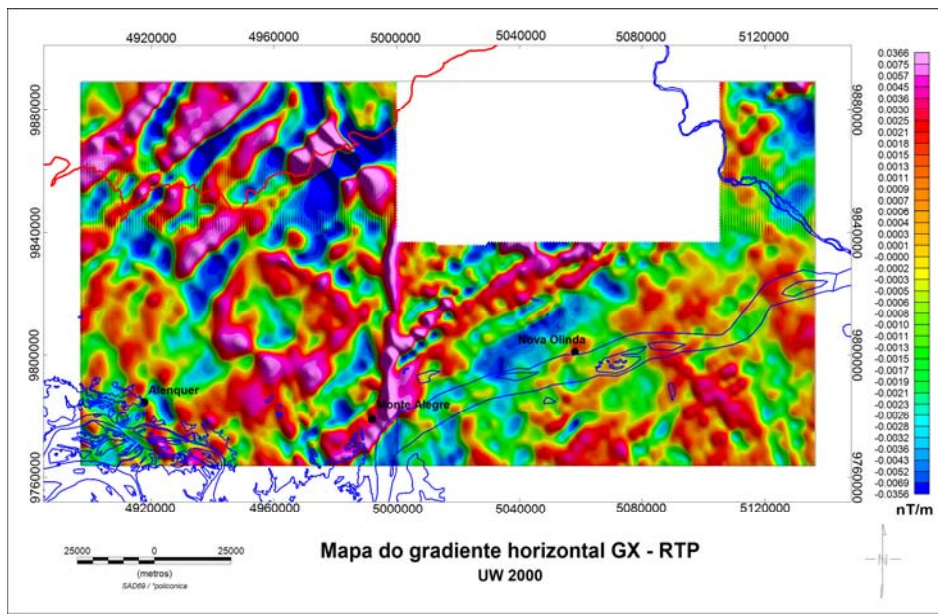
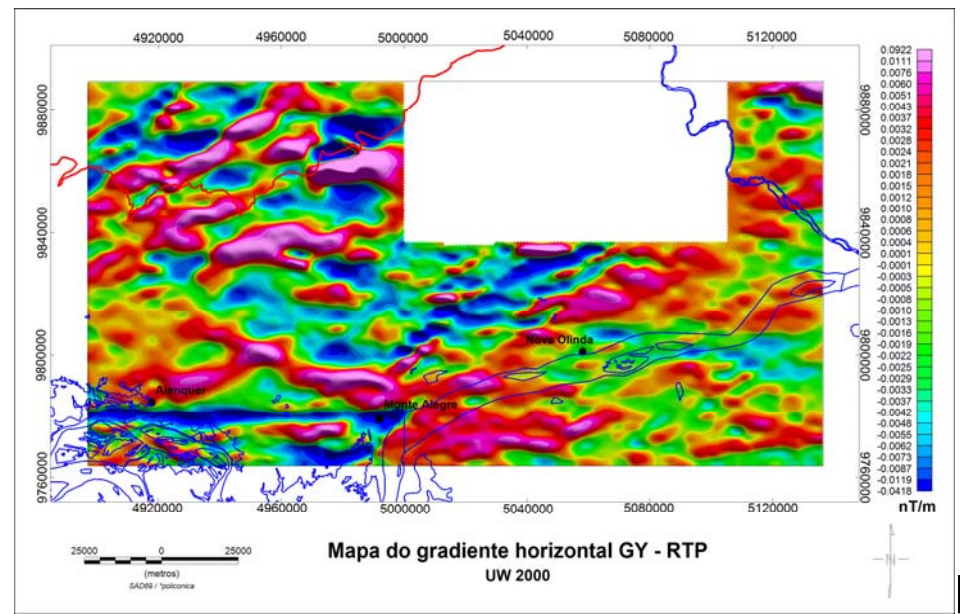


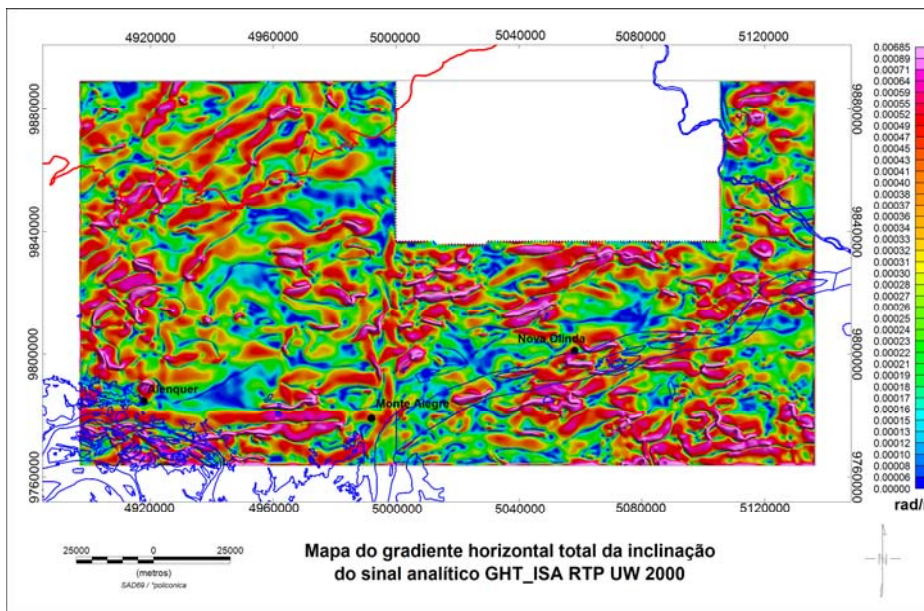
Figura 5.4-11: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre (A): mapa residual RTP continuado para 2.000 metros; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem.



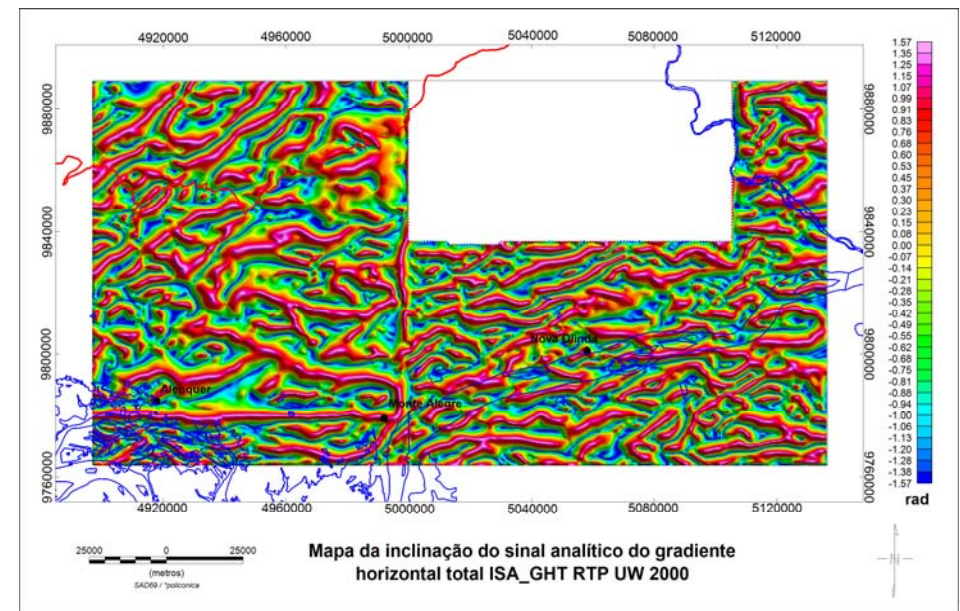
G



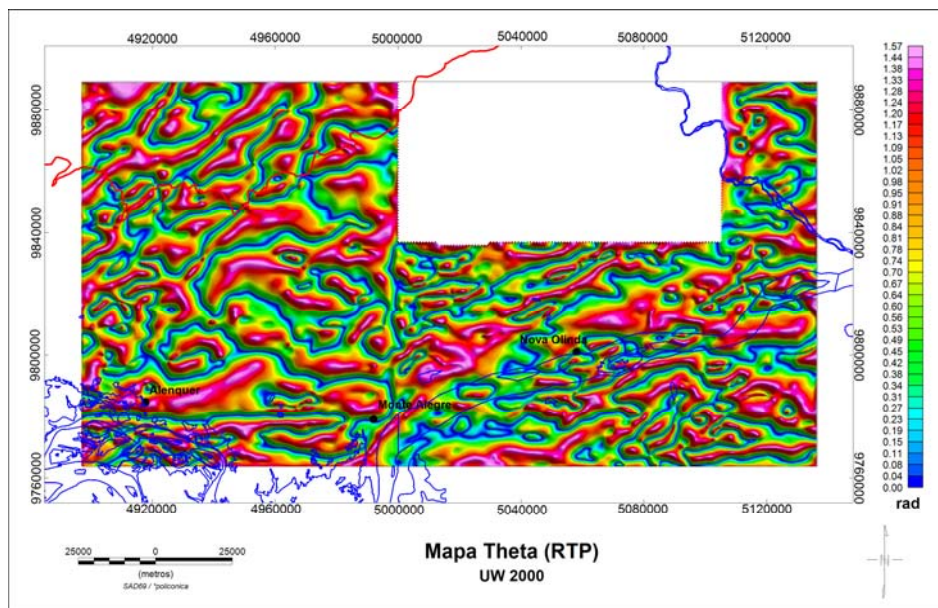
H



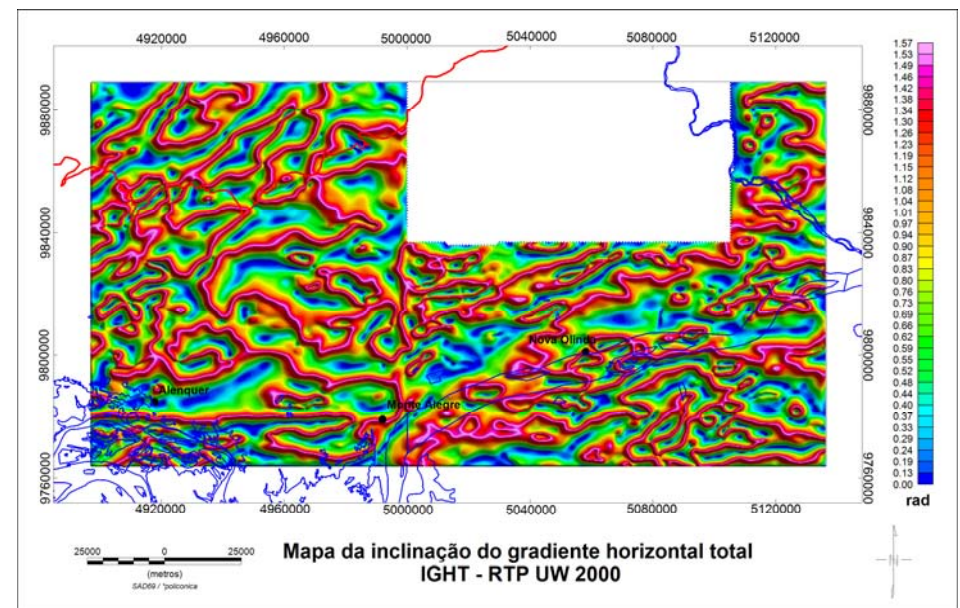
I



J



K



L

Figura 5.4-12: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre: (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) mapa Theta e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total.

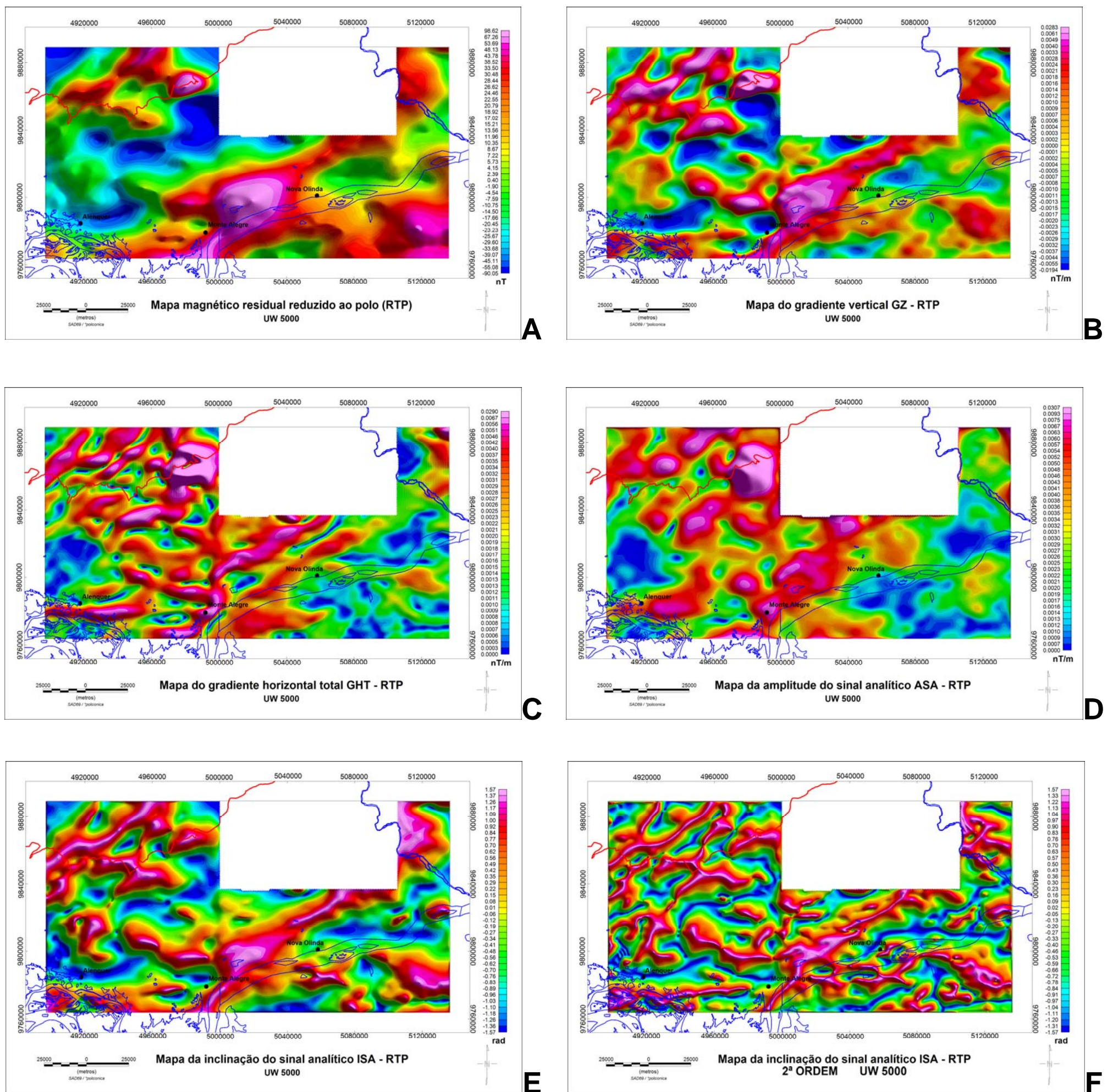


Figura 5.4-13: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre: (A) mapa residual RTP continuado para 5.000 metros; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem.

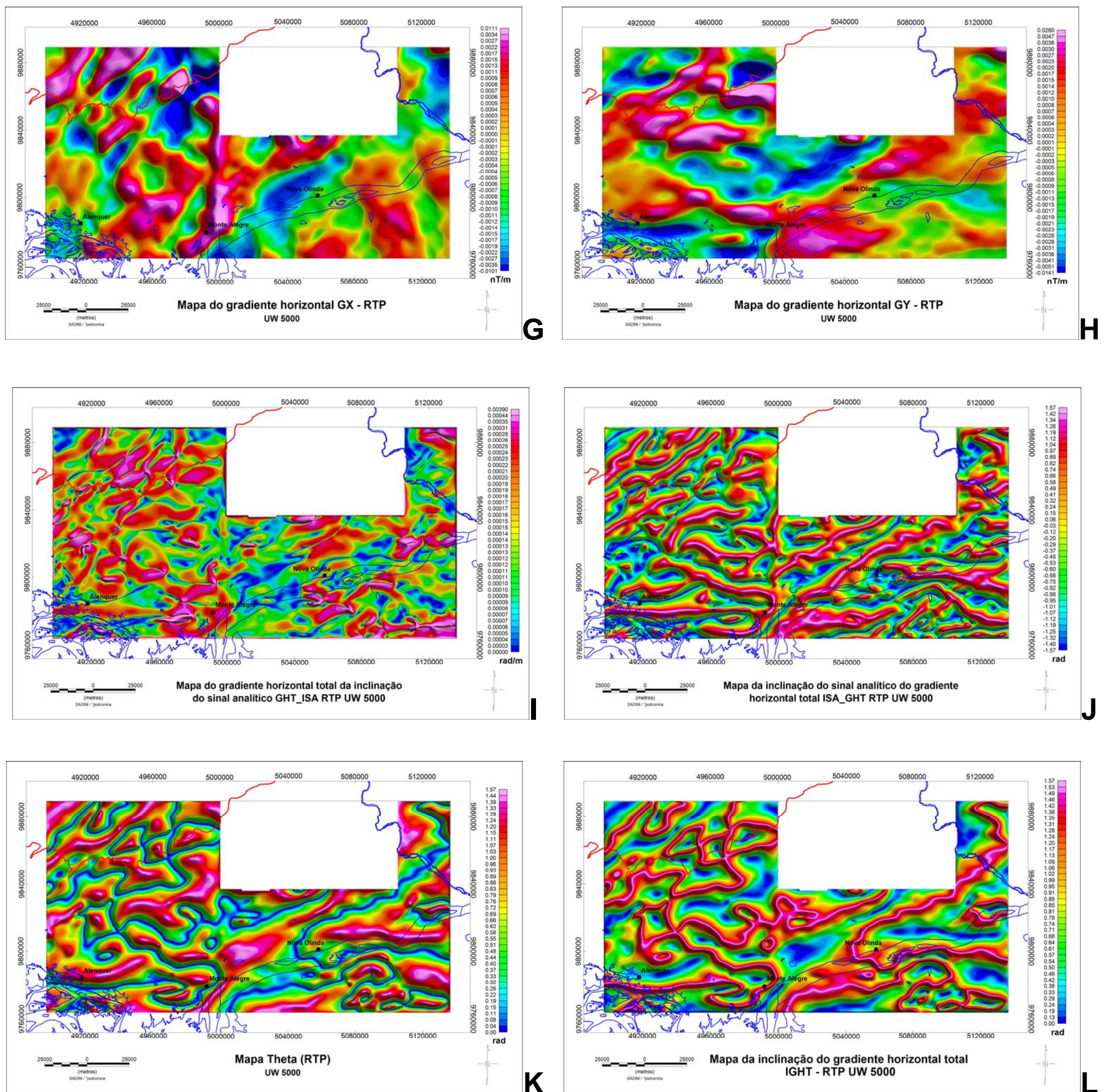


Figura 5.4-14: Mapas magnéticos da subárea Monte Alegre: (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) mapa Theta e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total;

A integração das respostas dos filtros de realce permitiu elaborar um mapa final de interpretação qualitativa, onde as principais fontes anômalas são representadas (Figura 5.4-15). A partir deste mapa foram elaborados diagramas de roseta de frequência e comprimento dos lineamentos geofísicos que permitem visualizar direções preferenciais para comprimento N60-70E e E-W e direções subordinadas NW, para as frequências observa-se a direção preferencial E-W e N40-70E e subordinadas NW (Figura 5.4-16).

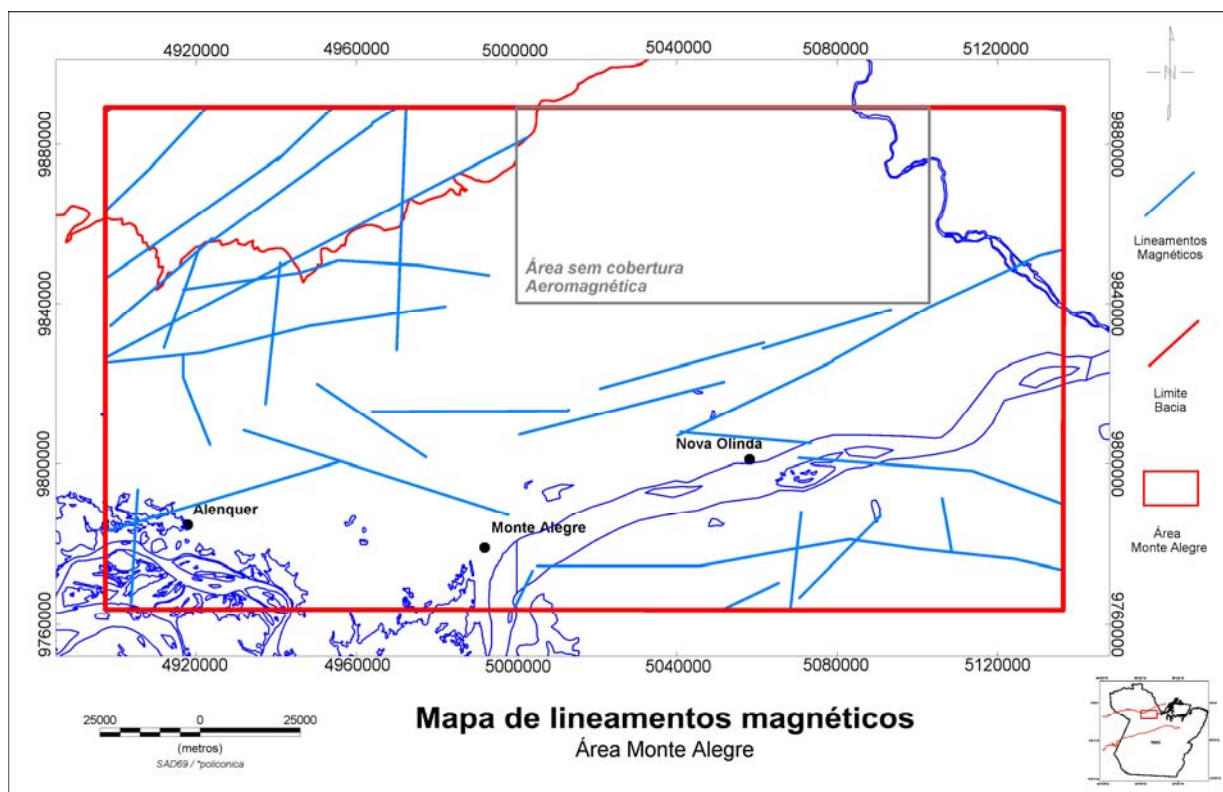


Figura 5.4-15: Mapa de lineamentos magnéticos da subárea Monte Alegre.

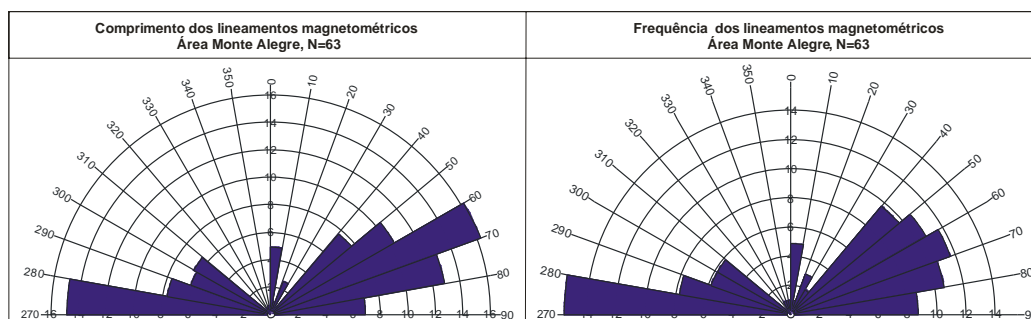


Figura 5.4-16: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos magnéticos da subárea.

5.4.6.2 Interpretação semi-quantitativa

A análise semi-quantitativa dos dados magnéticos da subárea procedeu-se com a utilização de métodos automatizados estatísticos de obtenção de profundidades de fontes magnéticas: o espectro de potência radial e a deconvolução de Euler.

Na Figura 5.4-17 está representado o espectro de potência para a subárea de estudo, gerado a partir do mapa magnético residual, o qual apresenta o número de onda no eixo x e o logaritmo do espectro de potência no eixo y. Também é apresentada nesta figura a profundidade estimada para cada número de onda correspondente.

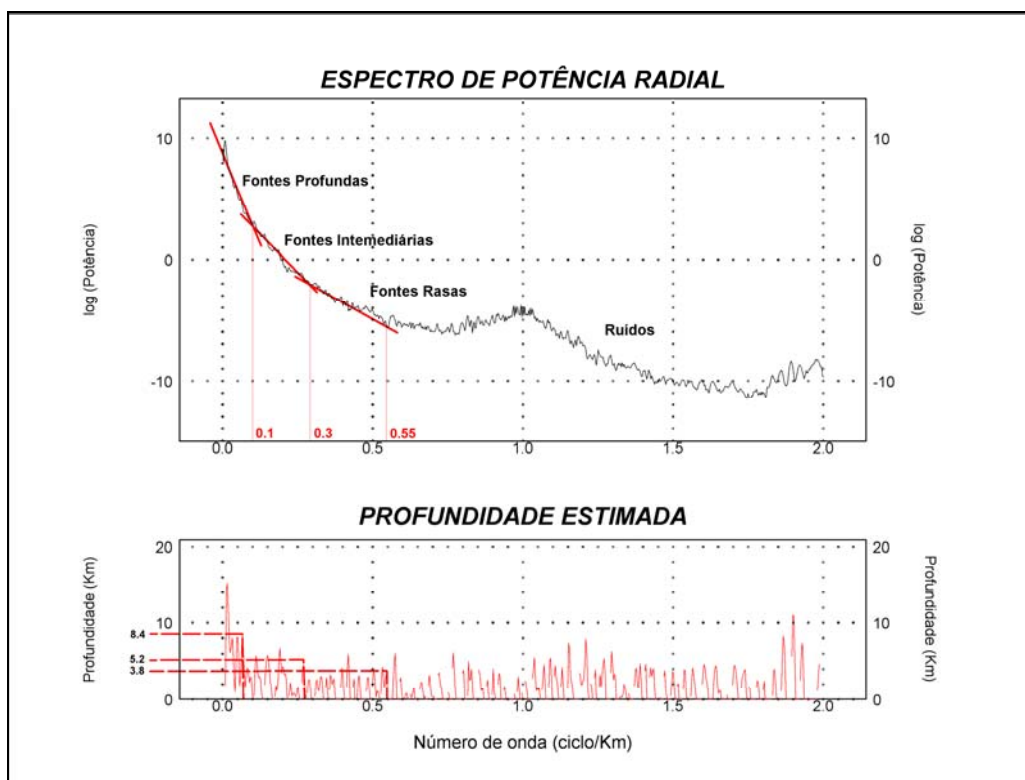


Figura 5.4-17: Espectro de potência radial gerado a partir do mapa magnético residual.

De acordo com a Figura 5.4-17 são discriminadas três partições marcadas pelas mudanças no declive da função espectral, as quais correspondem às profundidades das fontes, que são:

- fontes profundas: apresentam comprimento de onda maior que 10km e profundidades médias entre 8,4 a 10 km;
- fontes intermediárias: discriminadas entre os comprimentos de onda de 10 km e 3,3 km, representando profundidades médias das fontes de 5,2 a 8,4 km;
- fontes rasas + ruídos: na última partição do espectro estão presentes as fontes correspondentes a corpos rasos e ruídos, os quais apresentam comprimentos de onda de 3,3 a 1,8 km e profundidades médias de 3,8 a 5,2 km, apesar de estarem relacionadas a profundidades variadas devido aos ruídos.

O método de deconvolução de Euler foi aplicado sobre os dados o campo magnético residual da subárea de estudo, para os modelos dique e contato, como mostram a Figura 5.4-18 e a Figura 5.4-19, respectivamente. Sobrepostos as soluções geradas são apresentados os lineamentos magnéticos obtidos a partir da interpretação qualitativa.

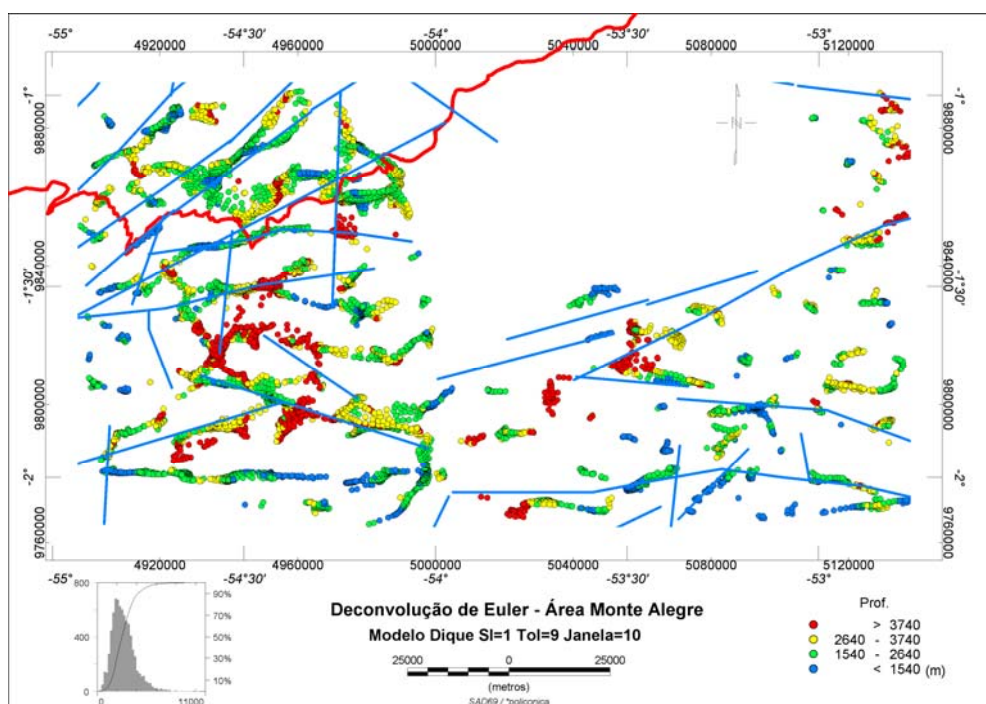


Figura 5.4-18: Mapa das soluções de Euler da subárea Monte Alegre para o modelo dique.

Para o modelo dique, de acordo com o histograma gerado, foram obtidas soluções de profundidades que variam de 1.500 a <3.700m divididas em classes e cores para visualização. As soluções geradas apresentam concordância com as profundidades no contexto da bacia, ainda, observa-se presença de soluções semicirculares de maior profundidade no entorno do domo de Monte Alegre. Verifica-se na porção noroeste da subárea sobreposição das soluções aos lineamentos. Algumas estruturas E-W são marcadas pelas soluções de Euler com baixas profundidades.

Para o modelo contato foram geradas poucas soluções satisfatórias, com profundidades entre 300 e 1.400 metros. Destaca-se a presença de soluções circulares nas proximidades do domo de Monte Alegre.

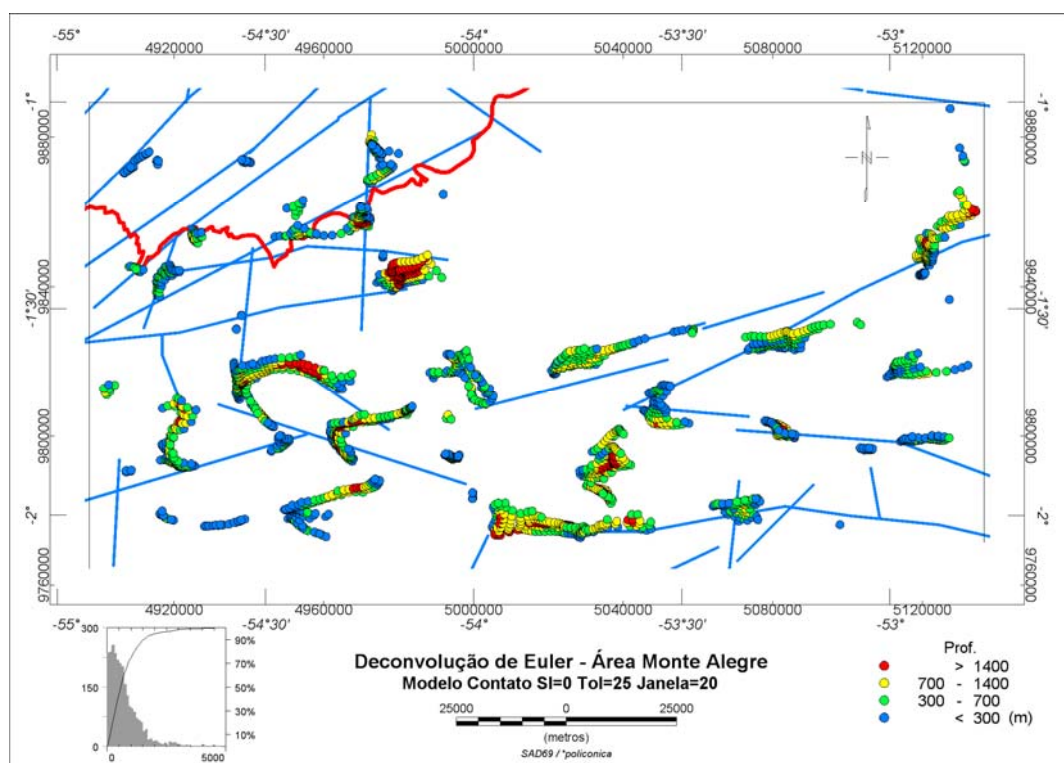


Figura 5.4-19: Mapa das soluções de Euler da subárea Monte Alegre para o modelo contato.

5.4.7 Arcabouço estrutural-gravimétrico

5.4.7.1 Interpretação qualitativa

A análise do arcabouço estrutural-gravimétrico da subárea Monte Alegre foi apoiada nos dados gravimétricos terrestres fornecidos pela Petrobras (Figura 5.4-7). Para o processamento e interpretação qualitativa dos dados, fez-se uso do *software* Oasis Montaj v. 6.3 da Geosoft™.

Os métodos de realce de anomalias, descritos no Capítulo 2, foram aplicados aos dados gravimétricos resultando em um mapa preliminar de interpretação gravimétrica qualitativa. Todos os mapas foram pseudo-iluminados na direção N45E, com a finalidade de melhorar a apresentação e realçar as estruturas de interesse.

A interpretação gravimétrica qualitativa envolveu o traçado dos principais lineamentos geofísicos sobre os diversos mapas gravimétricos derivados dos métodos de realce de anomalias, visualizados na Figura 5.4-20 e Figura 5.4-21.

A resposta apresentada para cada filtro, de acordo com a característica de realce de cada método e, a partir da interpretação sobre os mesmos, foram traçados lineamentos gravimétricos.

O mapa gravimétrico Bouguer mostra a presença de duas feições principais circulares de alta amplitude (altos gravimétricos) e uma subordinada, também circular, num *trend* de direção NE que cruza a área.

O filtro GZ e o filtro ASA intensificam a presença destas estruturas e o filtro GHT parece delinear as bordas destes corpos, apesar de apresentar-se um pouco ruidoso. O filtro ISA de 1ª e 2ª ordens também ressaltam estas estruturas. Os filtros de 2ª ordem, GHT_ISA e ISA_GHT; auxiliaram no refinamento destas feições.

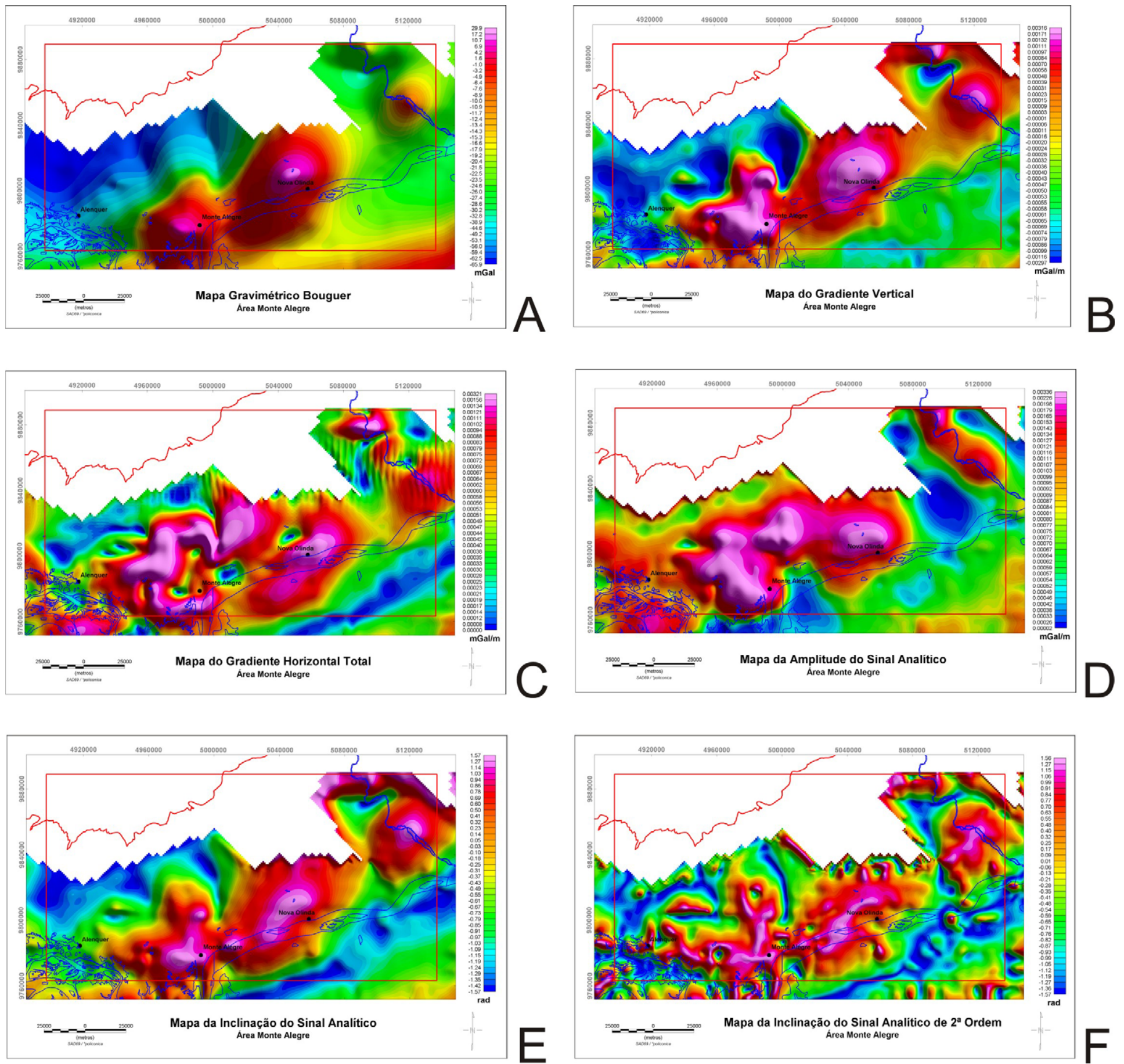


Figura 5.4-20: Mapas gravimétricos da subárea Monte Alegre (A) mapa gravimétrico Bouguer; (B) mapa do gradiente vertical; (C) mapa do gradiente horizontal total; (D) mapa da amplitude do sinal analítico; (E) mapa da inclinação do sinal analítico de 1ª ordem e (F) mapa da inclinação do sinal analítico de 2ª ordem.

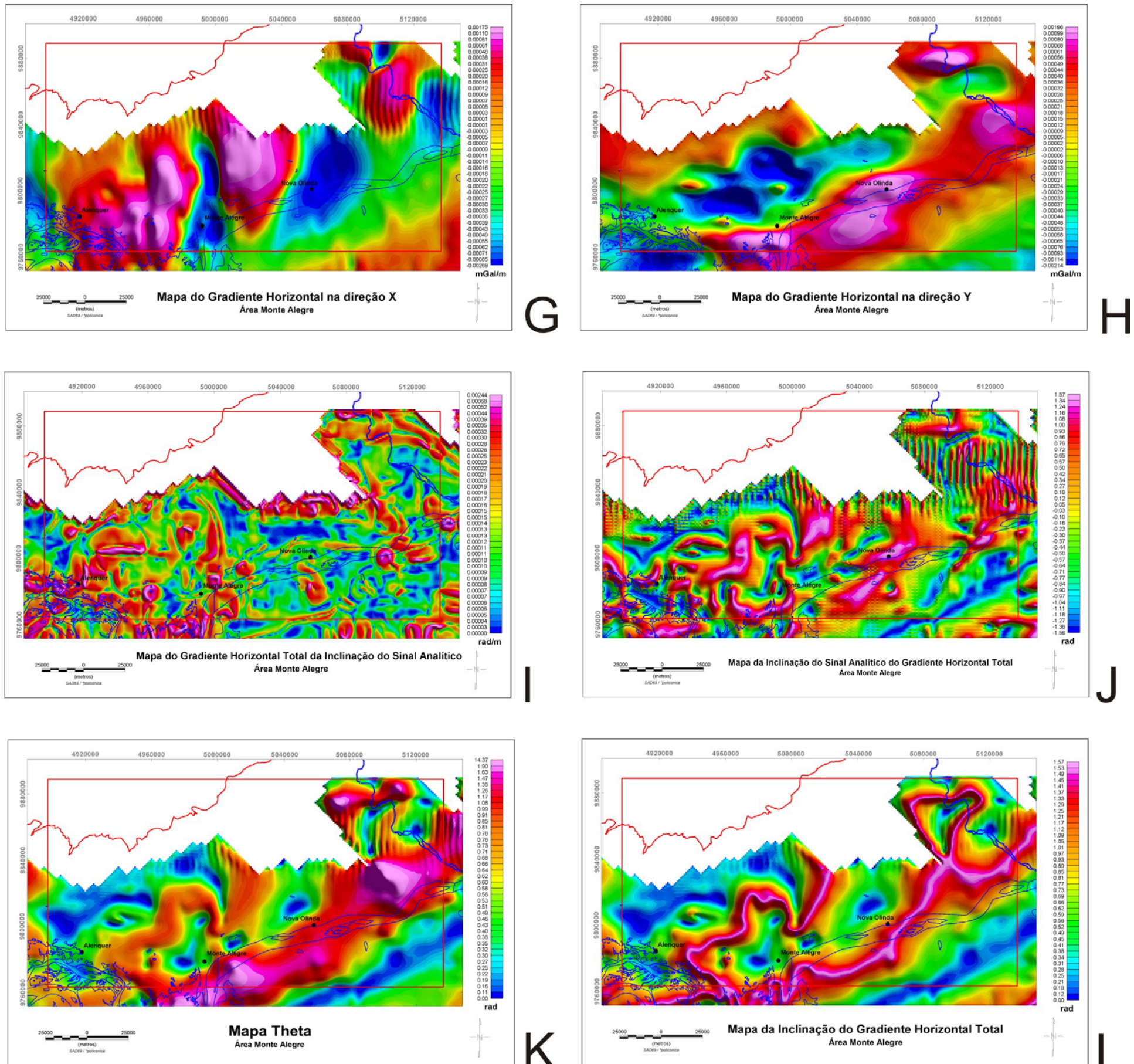


Figura 5.4-21: Mapas gravimétricos da subárea Monte Alegre (G) mapa do gradiente horizontal na direção x; (H) mapa do gradiente horizontal na direção y; (I) mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico; (J) mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total; (K) mapa *Theta* e (L) mapa da inclinação do gradiente horizontal total.

A integração dos resultados da aplicação dos filtros de realce de anomalias permitiu elaborar um mapa final de interpretação qualitativa (Figura 5.4-22), a partir da qual foram elaborados diagramas de roseta de frequência e comprimento dos lineamentos geofísicos permitindo visualizar direções preferenciais N50-60E e subordinadas N-S (Figura 5.4-23).

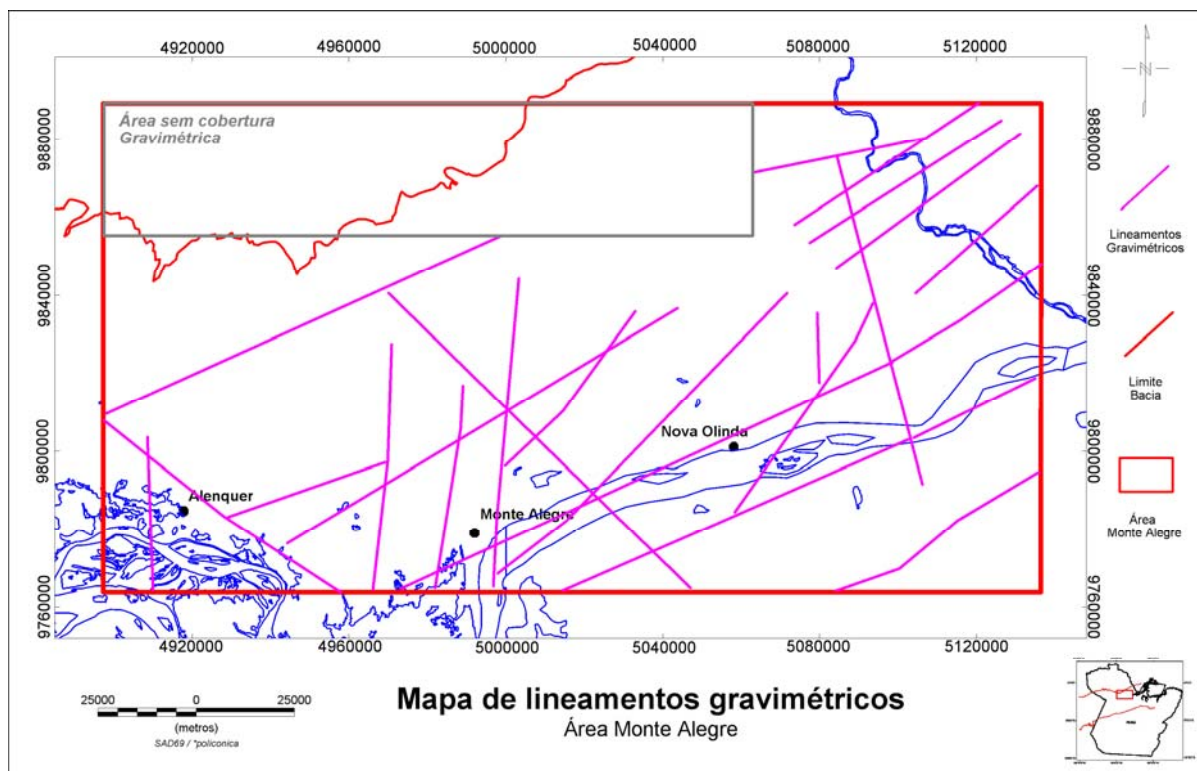


Figura 5.4-22: Mapa de lineamentos gravimétricos da subárea Monte Alegre.

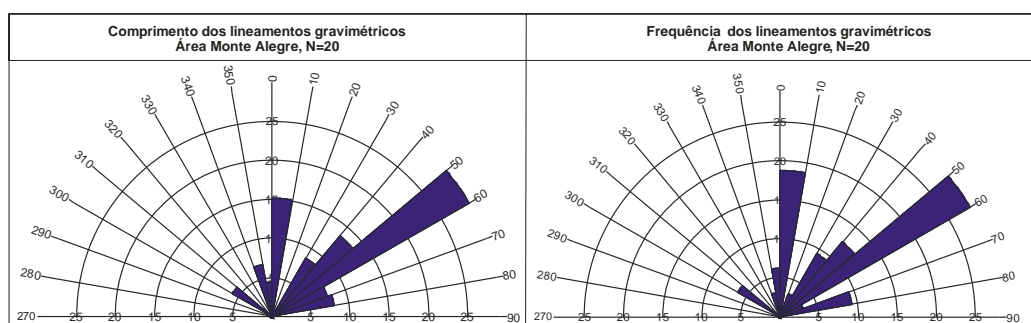


Figura 5.4-23: Diagramas de roseta de comprimento e frequência acumulados dos lineamentos geofísicos da subárea.

A interpretação dos dados gravimétricos envolveu a separação regional-residual, a qual discrimina o sinal gravimétrico de fontes rasas e profundas através de superfícies polinomiais. Após análise preliminar, foi selecionada a superfície polinomial de 3º grau como a mais representativa do campo regional, a qual foi

subtraída dos dados Bouguer gerando o mapa residual de 3º grau (Figura 5.4-24), do que decorreu a identificação de quatro altos gravimétricos residuais, denominados de MA1 a MA4.

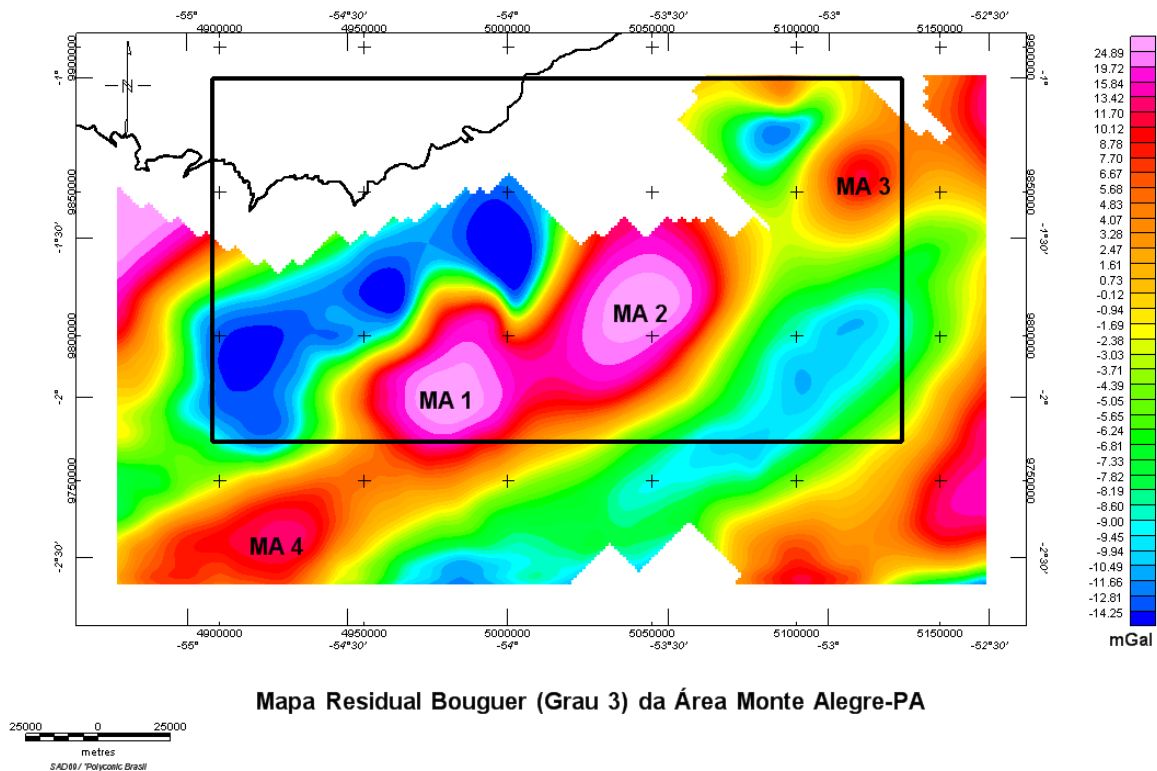


Figura 5.4-24: Mapa residual de 3º grau da região de Monte Alegre-PA indicando os altos gravimétricos (MA1 a MA4) e o limite da Bacia do Amazonas (em preto).

5.4.7.2 Interpretação semi-quantitativa

A interpretação semi-quantitativa da subárea de estudo foi realizada através da aplicação do método de deconvolução de Euler aos dados gravimétricos Bouguer.

A interpretação dos lineamentos, em correspondência às soluções de Euler geradas para o modelo dique (Figura 5.4-25), foi sobreposta ao mapa da inclinação do sinal analítico. Observou-se a predominância de estruturas gravimétricas segundo tendências NE, aparentemente segmentadas por feições submeridianas e NW.

Como o Domo de Monte Alegre é uma feição subcircular, supostamente com raízes em profundidade, foram testados os modelos *pipe*/cilindro ($SI=1$) e esfera ($SI=2$), cujos resultados são apresentados, respectivamente, na Figura 5.4-26 e na Figura 5.4-27. As soluções de Euler resultantes melhor se ajustaram aos altos residuais gravimétricos MA2 e MA3, onde estão assinaladas morfoestruturas e estruturas radiais/centrípetas definidas por Figueira (2009). O alto gravimétrico MA1 está em clara correspondência ao trato de exposição do Domo de Monte Alegre. Portanto, por analogia, é possível que os demais altos gravimétricos (MA2, MA3 e MA4) reflitam feições geológicas em subsuperfície semelhantes ao Domo de Monte Alegre, as quais são aparentemente controladas por estruturas NE.

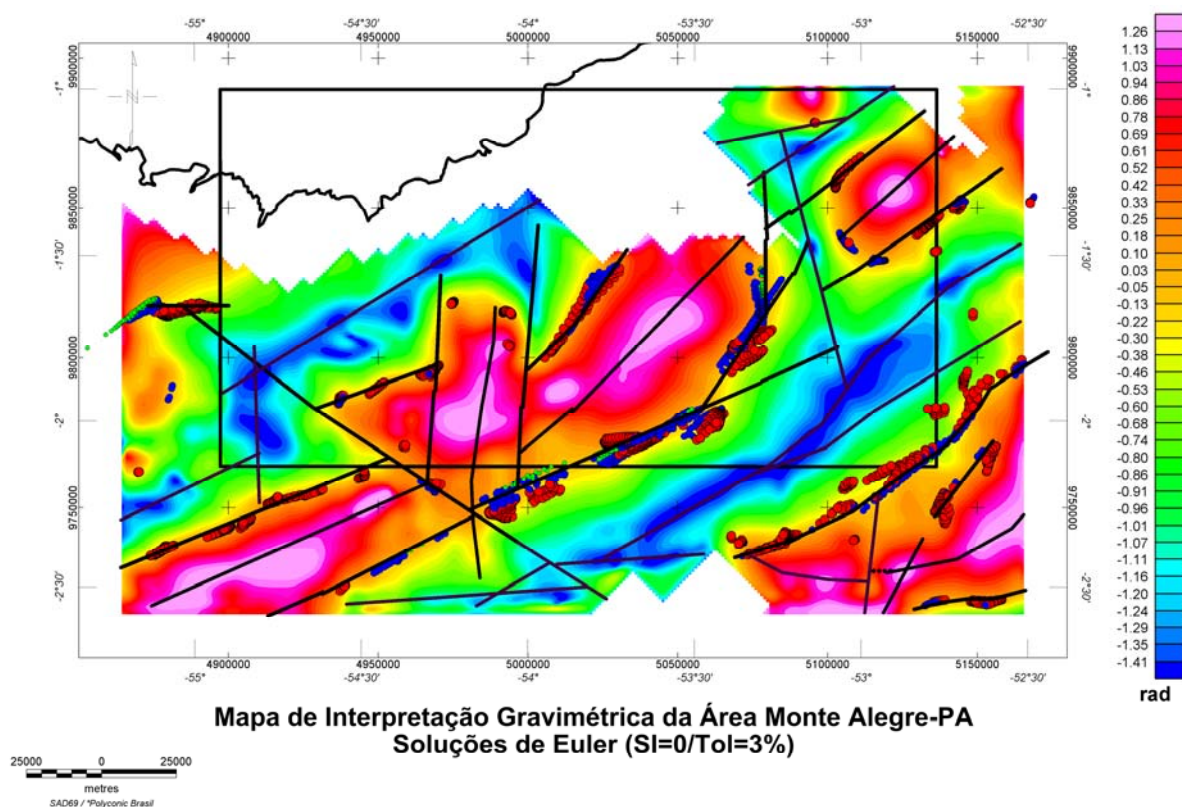


Figura 5.4-25: Mapa de interpretação qualitativa da região de Monte Alegre indicando os lineamentos gravimétricos (linhas pretas), o mapa da inclinação do sinal analítico e as soluções de Euler para o modelo soleira/dique/degrau ($SI=0$) com tolerância de 3% na determinação das profundidades das fontes (círculos vermelhos, azuis e verdes representam fontes profundas, intermediárias e rasas, respectivamente).

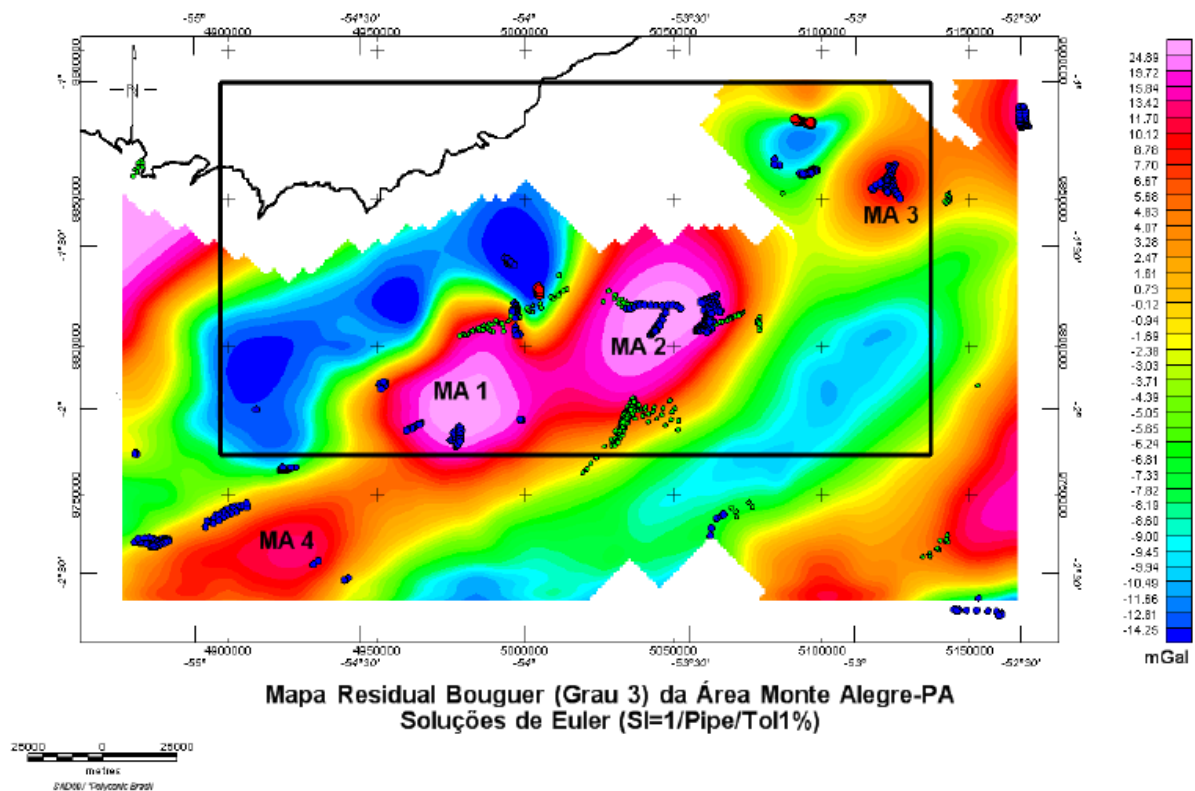


Figura 5.4-26: Mapa gravimétrico residual de 3º grau indicando as soluções de Euler para o modelo pipe (SI=1) com tolerância de 1% na determinação das profundidades das fontes (círculos vermelhos, azuis e verdes representam fontes profundas, intermediárias e rasas, respectivamente).

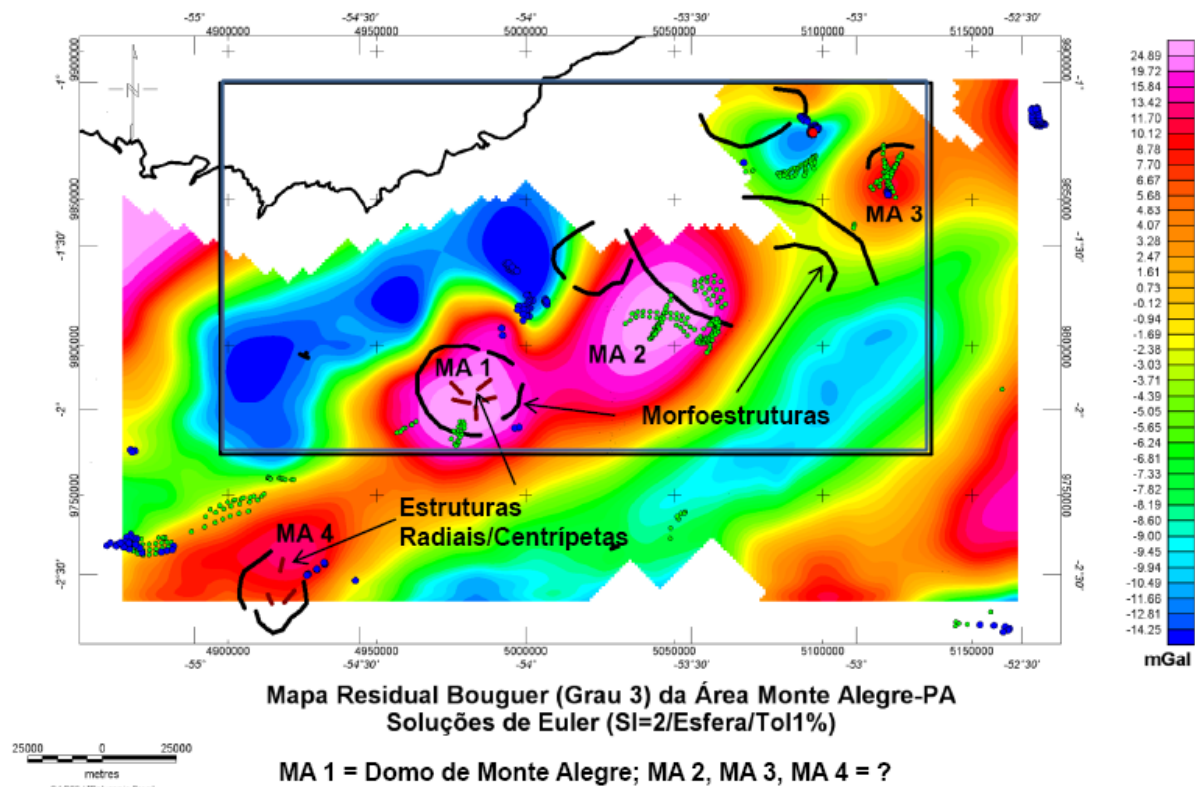


Figura 5.4-27: Mapa gravimétrico residual de 3º grau indicando as soluções de Euler para o modelo esfera (SI=2) com tolerância de 1% na determinação das profundidades das fontes (círculos vermelhos, azuis e verdes representam fontes profundas, intermediárias e rasas, respectivamente). Morfoestruturas em preto e estruturas radiais/centrípetas em marrom.

5.4.8 Discussão

Os contatos geológicos das formações paleozóicas da Bacia do Amazonas na subárea de estudo denotam uma reentrância para o interior da bacia, sugerindo a existência de um arqueamento, aqui preliminarmente denominado Arco de Monte Alegre (Figura 5.4-28). Tais arqueamentos são comuns na maioria das bacias intracratônicas (e.g. Arco de Ponta Grossa na Bacia do Paraná) e denotam disposição semelhante dos estratos paleozóicos. Também se observou o posicionamento do Domo de Monte Alegre no contexto de interseção de tendências dispostas segundo NW e NE, as quais podem se relacionar com estruturas do embasamento.

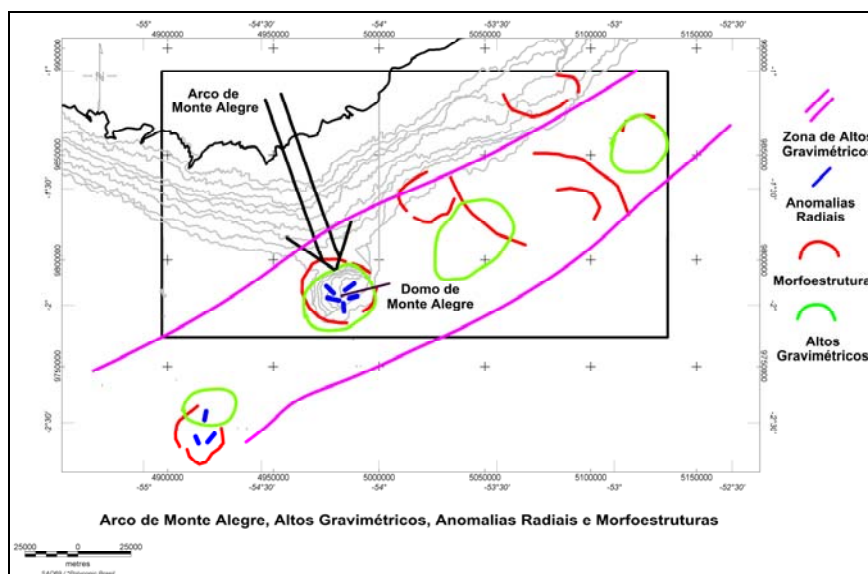


Figura 5.4-28: Mapa indicativo da reentrância das formações paleozóicas da Bacia do Amazonas na subárea de estudo (Arco de Monte Alegre) exibindo a localização do Domo de Monte Alegre, os altos gravimétricos, as morfoestruturas e as anomalias radiais de drenagem.

Este item também apresenta a sobreposição das interpretações dos lineamentos geofísicos em correspondência aos lineamentos SRTM e dados de campo, através de um mapa integrado (Figura 5.4-29).

Em continuidade, com base na coincidência ou proximidade de suas respectivas direções principais, foram estabelecidas faixas estruturais (Figura 5.4-30). Cabe salientar a ausência de levantamentos gravimétricos e magnéticos na porção setentrional da subárea, ilustrada na Figura 5.4-29.

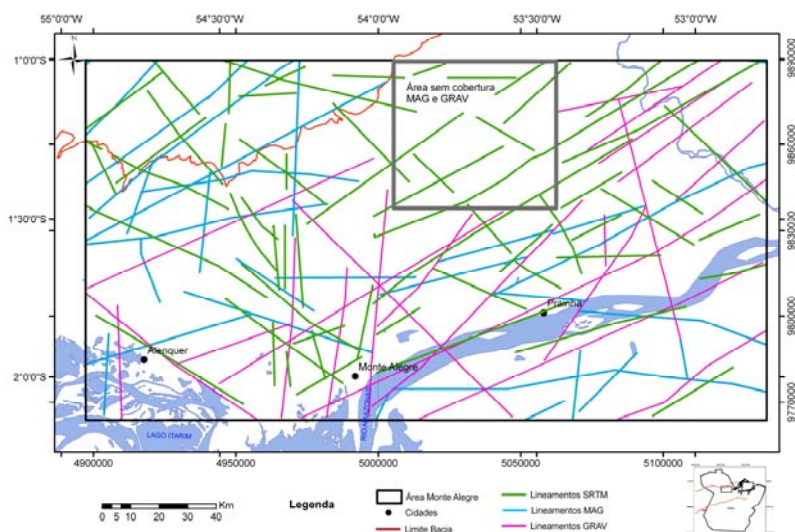


Figura 5.4-29: Mapa dos lineamentos SRTM (verde), magnéticos (azul) e gravimétricos (rosa) da subárea Monte Alegre indicando o limite da Bacia do Amazonas (vermelho) e o rio Amazonas (azul).

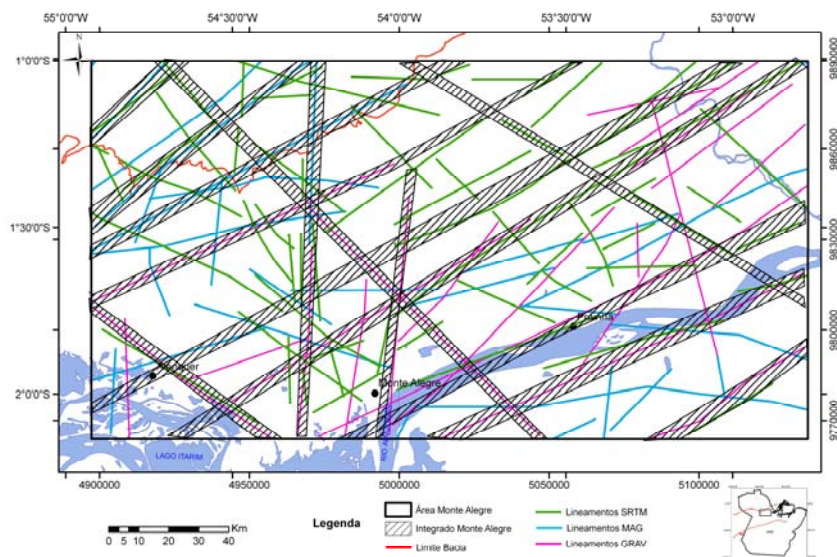


Figura 5.4-30: Mapa dos lineamentos SRTM (verde), magnéticos (azul) e gravimétricos (rosa) da subárea Monte Alegre indicando as faixas estruturais, o limite da Bacia do Amazonas (vermelho) e o rio Amazonas (azul).

Os resultados da Figura 5.4-30 permitem tecer as seguintes considerações:

- As faixas estruturais exibem direções NE preferenciais e NW subordinadas, ambas subparalelas às grandes estruturas propostas na literatura (e.g. REZENDE & BRITO, 1973; CORDANI, 1984; CARNEIRO & JUCÁ, 1985, HASUI *et al.*, 1984, WANDERLEY FILHO, 1991 e VASQUEZ, 2008);

- As faixas estruturais NE apresentam notável paralelismo, tanto na bacia quanto no embasamento. Estas estruturas parecem controlar os altos gravimétricos relacionados ao Domo de Monte Alegre;
- De acordo com Araújo *et al.* (1976), as estruturas dômicas (circulares) dispostas segundo as faixas estruturais NE relacionam-se a anomalias morfoestruturais da rede de drenagem e podem se vincular à ascensão de plútons;
- Faixas estruturais NW ocorrem em menor proporção, sendo preferencialmente definidas por lineamentos SRTM;
- As faixas estruturais NS e N-NE envolvem o domo de Monte Alegre e estão indicadas no mapa geológico do Estado do Pará, recentemente publicado (VASQUEZ, 2008), podendo encerrar diques de diabásio assim orientados. Tais tendências, de acordo com TASSINARI & MACAMBIRA (1999) podem estar relacionadas à intrusão de rochas alcalinas ácidas na Província Amazônia Central ao Norte da subárea de estudo;
- A intersecção de faixas estruturais NE, NW e N-S, comuns à bacia e ao embasamento, parecem confinar o Domo de Monte Alegre. Lemos & Gaspar (2002) caracterizam estas áreas como zonas de fraqueza crustal (suturas), que poderiam criar condutos capazes de permitir a ascensão dos magmas básicos, alcalinos e carbonatíticos;
- As análises geofísicas semi-quantitativas mostraram soluções de Euler de forma aproximadamente circular, em correspondência às anomalias morfoestruturais, e em profundidades maiores que 4.000 m, portanto relacionadas ao embasamento;
- Os diagramas de roseta dos lineamentos SRTM, magnéticos e gravimétricos (Figura 5.4-30) exibem grande similaridade, tanto para comprimento quanto para frequência, com presença de direções NW, NE, E-W e N-S.

6 CONCLUSÕES

A Geofísica é atualmente uma ferramenta imprescindível no auxílio à geologia. Através de métodos potenciais é possível gerar modelos geofísico-estruturais de sub-superfície. A redução dos dados, seguida da aplicação de técnicas de interpretação qualitativa e semi-quantitativa ofereceram bons resultados para os estudos estruturais realizados, uma vez que as anomalias observadas são decorrentes de contrastes de propriedades físicas das rochas, entre o embasamento e os sedimentos da bacia.

A criação do programa GRAV_MAG_PRISMA durante a realização dos estudos geofísicos auxiliou na interpretação dos dados magnéticos e gravimétricos, permitindo um maior conhecimento da resposta dos filtros de realce de anomalias, incluído o filtro ISA_GHT, principalmente quando aplicados em regiões de baixas latitudes magnéticas.

As principais conclusões referentes à interpretação geofísico-estrutural das áreas de estudo podem ser assim sumariadas:

- Bacia do Amazonas – a interpretação de lineamentos gravimétricos na Bacia do Amazonas, mesmo em função da ausência de dados no embasamento exposto, mostrou boa concordância com as estruturas geológicas definidas na literatura. Foi possível constatar tal concordância principalmente segundo a direção NW, mas também em relação à direção NE, vinculada ao depocentro e as linhas de charneira da bacia, a qual é marcadamente segmentada pelas tendências NW. Os dados magnéticos, por envolverem toda a área de estudo, permitiram reconhecer tendências nas mesmas direções NW dos lineamentos gravimétricos, mas que continuam para o embasamento exposto (meridional e setentrional), refinando os limites das províncias geológico-geocronológicas sugeridas por vários autores. Portanto, o quadro tectônico do embasamento é caracterizado por tendências NW, enquanto o da bacia revela direções NE e NW. Entretanto, a presença no

embasamento setentrional do cinturão K'mudku, de direção NE, apoiou a interpretação de que feições geológicas nesta direção, constatadas no contexto da bacia, poderiam ter origem relacionada a reativações de descontinuidades estruturais herdadas dos domínios do embasamento.

- Subárea Tapajós – a integração das estruturas geofísicas se harmonizou tanto aos lineamentos propostos neste relatório, quanto aos dados da bibliografia. Assim, se verificou a concordância das direções preferenciais e secundárias, permitindo constatar que as tendências NW, presentes no embasamento e por vezes adentrando a bacia, são mais antigas do que as feições NE e EW.

- Subárea Xingu – além das constatações anteriores, se verificou um *trend* de estruturas NW do embasamento que adentram a bacia, como também a concordância dos domínios magnéticos com compartimentos geológicos do embasamento.

- Subárea Monte Alegre – a intersecção de faixas estruturais NE, NW e NS, comuns à bacia e ao embasamento, foi interpretada como condicionante da gênese do Domo de Monte Alegre. Tais faixas estruturais, caracterizadas na literatura como zonas de fraqueza crustal (suturas), geraram condutos capazes de permitir a ascensão de magmas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, B.N.P.; SHAW R.K. Comment on an analytic signal approach to the interpretation of total field magnetic anomalies by Shuang Qin. **Geophysical Prospecting**, v. 44, p.911-914, 1996.

AIRES, J.R. **Estudo do vulcanismo básico da bacia do Amazonas**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1984. Relatório técnico.

ALMEIDA, F.F.M. **Origem e evolução da plataforma brasileira**. Rio de Janeiro:DNPM, Boletim 241, 1967. 36p. Relatório técnico

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES B.B.; FUCK R.A. Províncias estruturais. In: SIMP. GEOL. NORDESTE, 1977, Campina Grande, **Atas...** Campina Grande, 1977. p. 363-391.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI Y.; RODRIGUES, E.P.; YAMAMOTO, J. A Faixa de Dobramentos Araçuaí na região do Rio Pardo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., 1978, Recife. **Anais...**, Recife:SBG, 1978. v.1, p. 270-283.

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo: Edgard Blucher, 1984.

ALMEIDA, F.F.M. Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-paleozóico no Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 325-349, 1986.

ALMEIDA, J.C.H.; HEILBRON, M.; EBERT, H.D. Structural framework of the central Ribeira Belt. In: XXXI INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 2000, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro:International Union of Geological Sciences, 2000.

AMARAL, G. **Geologia Pré-Cambriana da região Amazônica**. 212 f. Tese de Livre Docência - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974.

ARAUJO, J.F.V.; MONTALVÃO, R.M.G.; LIMA, M.I.C.; FERNANDES, P.E.C.A.; CUNHA, F.M.B.; FERNANDES, C.A.C.; BASEI, M.A.S. Brasil. Departamento de Nacional da Produção Mineral. Projeto Radambrasil. **Folha Santarém**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro. (Levantamentos de Recursos Minerais, 10), 220 p. 1976.

BAHIA, R.R; ABREU, F.A.M. O rift do Amazonas – sistema aulacogênico na Plataforma amazônica. In: II SIMP. DE GEOL. AMAZÔNIA, 1985, Belém. **Anais...** Belém, 1985. p. 222-241.

BARROS, C.E.M.; MACAMBIRA, M.J.B.; SANTOS, M.C.C.; SILVA, D.C.C.; PALMEIRA, L.C.M.; SOUSA, M.M. Estruturas sinmagmáticas e idade de zircão de granitos (evaporação de Pb) paleoproterozóicos da parte leste do domínio Bacajá, Província Maroni- Itacaiúnas. **Revista Brasileira de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 293-304, 2007.

BHASKARA, R.A.O.D.; RAMESH BABU, N. A rapid method for three-dimensional modeling of magnetic anomalies. **Geophysics**, v. 56, n. 11, p. 1729-1737, 1991.

BHATTACHARYYA, B.K. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. **Geophysics**, v. 29, n. 4, p. 517-531, 1964.

BIGARELLA, J.J. Paleocurrents and the problem of continental drift. **Geol. Rundschau**, v. 62, p. 442 – 477, 1973.

BLAKELY, R.J. **Potential theory in gravity and magnetic applications**. Cambridge: Cambridge University Press, 441 p., 1995.

BLUM, M.L.B. **Processamento e Interpretação de dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral**. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229p. 1999.

BONGIOLO, A.B.S., FERREIRA, F.J.F.; BARROS, C.E.M. Exemplos de penetratividade de estruturas geofísico-geológicas do embasamento na Bacia do Amazonas, **Boletim da Sociedade Brasileira de Geofísica**, Rio de Janeiro, 2009, nº5, p.16-19.

BONGIOLO, A.B.S.; DE SOUZA, J.; FERREIRA, F.J.F.; DE CASTRO, L.G. GRAV_MAG_PRISMA: Um programa em MATLAB®/OCTAVE para geração de anomalias gravimétricas e magnéticas de corpos prismáticos. **Revista Brasileira de Geofísica**. (submetido). 2011a.

BONGIOLO, A.B.S.; FERREIRA, F.J.F. Interpretação magnética-estrutural da região de Itaituba, estado do Pará- Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**. (submetido). 2011b.

BRIGGS, I.C. Machine Contouring Using Minimum Curvature. **Geophysics**, v. 39, n. 1, p.39-48, 1974.

BRITO NEVES, B.B.; CORDANI, U.G.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F.M.B. Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: a case of tectonic heritage. **Journal of Geodynamics**, v. 1, p.495-510, 1984.

CAPUTO, M.V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS D.N.N. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas – histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, São Paulo, **Anais...**São Paulo, 1972. p. 35-46.

CAPUTO, M.V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 583f. PhD Thesis, California University, Santa Barbara, 1984.

CARNEIRO, R.G.; JUCÁ, G.A.C. **Tectonismo Epirogenético e Transtensivo no Baixo Amazonas**. Belém: PETROBRAS/DINTER, 1985. 8p. Relatório técnico.

CAROZZI, A.V.; PAMPLONA, H.R.P.; CASTRO, J.C; CONTRONEIRAS, C.J.A. Ambientes deposicionais e evolução tecto-sedimentar da seção clástica paleozóica da bacia do médio amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracajú. **Anais....**Aracajú:SBG, 1973. p. 279

CORDANI, U.G.; TASSINARI, C.C.G.; TEIXEIRA, W.; BASEI M.A.S., KAWASHITA K. Evolução tectônica de Amazonia con base nos dados geochronologicos. In: CONGRESSO GEOLOGICO CHILENO. 2, **Anais.....**,1979. v. 4, p. 137-148.

CORDANI, U.G.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A.; PORTO, R.; THOMAZ FILHO, A.; CUNHA, F.M.B. **Estudo preliminar de integração do pré-cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras**. Rio de Janeiro:PETROBRAS - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello,. 1984. p. 27-34. Relatório técnico.

CORDELL, L.; GRAUCH, V. Mapping Basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New México. In: W. Hinze (ed.) **Utility of regional gravity and magnetic maps**. SEG, 1985. P.181-197.

COOPER, G.R.J.; COWAN, D.R. Enhancing potential field data using filters based on the local phase. **Computers & Geosciences**, v. 32, p.1585-1591, 2006.

COOPER GRJ & COWAN DR. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics. **Geophysics**, v. 73, n. 3, p. H1-H4, 2008.

COSTA, J.B.S.; PINHEIRO, R.V.L.; JOÃO, X.S.J.; ARAÚJO, O.J.B.. Esboço Estrutural do Proterozóico Médio da Amazônia Oriental. **Boletim do Museu Paraense Emilio Goeldi**, Série Ciências da Terra, v. 3, p. 9-23, 1991a

COSTA, J.B.S.; IGREJA, H.L.S.; BORGES, M.S.; HASUI, Y. Tectônica meso-cenozóica da região norte do Brasil, In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 3, Rio Claro, UNESP:SBG, 1991b. p. 108-110.

COSTA, J.B.S.; PINHEIRO, R.V.L.; REIS, N.J.; PESSOA, M.R.; PINHEIRO, S.S. O Hemigraben do Tacutu: uma estrutura controlada pela geometria do Cinturão de

Cisalhamento Guiana Central. **Geociências**, Unesp, Rio Claro, São Paulo, v.10, p.119-130, 1991c.

COSTA, A.R.A. **Bacia do Amazonas, sobre os *trends* estruturais cretáceos e as possibilidades da existência de acumulações comerciais de petróleo em armadilhas paleozóicas**. Belém: Petrobras, 1995. Relatório técnico.

COSTA, J.B.S.; HASUI, Y.; BORGES, M.S.; BEMERGUY, R.L. Arcabouço tectônico mesozóico-cenozóico da região da calha do Amazonas. **Geociências**, Unesp, Rio Claro, São Paulo, v. 14, n. 2, p.77-83, 1995.

COSTA, J.B.S. A neotectônica da Amazônia. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 5, **Resumos expandidos**....., p.35-38. 1996.

COSTA, J.B.S.; HASUI, H. Evolução geológica da Amazônia. In: M. L. Costa & R.S. Angélica (coords.) **Contribuições à Geologia da Amazônia**. Belém:FINEP, p. 15-90, 1997.

COSTA, A.R.A. **Tectônica Cenozóica e Movimentação Salífera na Bacia do Amazonas e suas Relações com a Geodinâmica das Placas da América do Sul, Caribe, Cocos e Nazca**. 237f. Dissertação (Mestrado em Geologia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

COSTA, D.T.; EBERT, H.D.; ALMEIDA, J.; EIRADO, L.G.; GONTIJO, A. Contato Tectônico Central da Faixa Ribeira: Limite Tectônico e Morfoestrutural. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS, 9/INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECTONICS, 3, **Boletim de Resumos**....., p. 291-294. 2003.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS. **Mapa aeromagnetométrico do Brasil**.1 Mapa Geofísico, CPRM, 2002 Escala 1:1.000.000.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. **Carta Geológica Brasil ao Milionésimo**. CPRM, 2004. Escala 1:1.000.000.

COMPANHIA DE PESQUISA E RECURSOS MINERAIS. Programa Geologia do Brasil. **Mapas geológicos estaduais. Geologia e recursos minerais do estado do Pará**. CPRM , 2008. Escala 1:1.000.000.

CUNHA, B.C.C.; TARAPANOFF, I. A Mesopotâmia Preto-Cajari (AP) e a seção siluro-devoniana na Bacia do Baixo Amazonas. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 2, **Resumos expandidos**..... 1985. p. 106-120.

CUNHA, P.R.C.; GONZAGA, F.G.; COUTINHO, L.F.C.; FEIJÓ, F.J. Bacia do Amazonas. **Boletim Geociências Petrobras**, v. 8, n. 1, p.47-67, 1994.

CUNHA, P.R.C. Faciologia e importância petrolífera dos arenitos da Formação Monte Alegre na área da Plataforma de Manaus Bacia do Amazonas. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 5, **Resumos expandidos**... 1996. p. 182-185.

DEBEGLIA, N.; CORPEL, J. Automatic 3-D interpretation of potential field data using analytic signal derivatives. **Geophysics**, v. 62, p.87-96, 1997.

DERBY, O.A. Contribuições para a geologia da região do Baixo Amazonas. **Arquivos do Museu Nacional**, Rio de Janeiro, Museu Nacional. v. 2, p. 77-104, 1877.

EVJEN, H.M. The place of vertical gradient in gravitational interpretations. **Geophysics**, v. 1, p.27-136, 1936.

FARACO, M.T.L.; VALE, A.G.; SANTOS, J.O.S.; LUZARDO, R.; FERREIRA, A.L.; OLIVEIRA, M.; MARINHO, P.A.C. Levantamento geológico da região ao norte da Província Carajás. In: CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, Manaus. **Anais**... 2005. p. 16-31.

FERREIRA, F.J.F.; DE SOUZA, J.; BONGIOLO, A.B.S.; De CASTRO, L.G.; ROMEIRO, M.A.T. Realce de anomalias magnéticas do gradiente horizontal total usando a inclinação do sinal analítico. Parte I - Aplicação a dados sintéticos. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOFÍSICA. 1 CD-ROM, 2193. Brasília-DF. **Resumos expandidos**...Brasília, 2010.

FIGUEIRA, I.F.R.; FIGUEIRA, E.G.; SALAMUNI, E.; MANCINI, F. Caracterização Morfoestrutural do Domo de Monte Alegre (PA). XI Simpósio de Geologia da Amazônia. Manaus. **Resumos expandidos**. Manaus, 2009. 4p.

FRAGA, L.M. **A associação Anortosito – Mangerito - Granito Rapakivi (AMG) do Cinturão Guiana Central, Roraima, e suas encaixantes paleoproterozóicas: Evolução Estrutural, Geocronologia e Petrologia**. 351f. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

GEOSOFT. **Microlevelling using bi-directional gridding**. Geosoft Technical Note, 2p. 2003.

GEOSOFT. **Magmap – 2-D Frequency Domain Processing**. Geosoft Technical Note, 34p. 2001.

GERALDES, M.C. A Paleogeografia da Amazônia e as Reconstruções dos Supercontinentes. In: Rosa-Costa, L.T.; Klein, E.L.; Viglio, E.P. **Contribuições à Geologia da Amazônia**. v. 5, p.49-62, 2007.

GUNN, P.J. Linear Transformations of Gravity and Magnetism Fields. **Geophysical Prospecting**. n. 23. p 300-312. 1975.

GUNN, P.J.; MILLIGAN, P.R. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 63-75. 1997a.

GUNN, P.J. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. **AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p. 105-113. 1997b.

HANEY, M.; JOHNSTON, C.; LI Y.; NABIGHIAN, M. Envelopes of 2D and 3D magnetic data and their relationship to the analytical signal. Preliminary results. In: SEG, ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 73, **Expanded Abstracts**....., p.592-595. 2003.

HASUI, Y.; HARALYI, N.L.E.; SCHOBENHAUS, C. Elementos geofísicos e geológicos da região amazônica: subsídios para um modelo geotectônico. In: SYMPOSIUM AMAZÔNICO, 2., Manaus, 1984. **Anais**.... Manaus:SBG, 1984. v.1, p. 129-147. 1984.

HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, 1, **Boletim**....., p. 1-31, n. 11. 1990.

HASUI, Y. Evolução geológica da Amazônia. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 5, **Resumos Expandidos**....., p. 31-34. 1996.

HORBE, A.M.C.; VIEIRA, L.C.; NOGUEIRA, A.C.R. Geoquímica de camadas vermelhas bioturbadas da Formação Alter do Chão, Cretáceo da Bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 3, p. 396-402. 2006.

HSU, S.K.; SIBUET, J.C.; SHYU, C.T. High-resolution detection of geological boundaries from potential-field anomalies: An enhanced analytical signal technique. **Geophysics**, v. 61, p.373-386. 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE**. Disponível em: <http://www.ibge.org.br>. Acesso em: 24 Janeiro 2008. 2008.

JOÃO, X.S.J.; VALE, A.G.; LOBATO, T.A.M. Projeto Altamira - Folha SA.22-Y-D. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos**, Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 31 p. Brasília. Projeto concluído. 1987.

LANGE, F.W. Subdivisão biostratigráfica e revisão da coluna siluro-devoniana da bacia do baixo Amazonas. In: ATAS DO SIMPÓSIO SOBRE A BIOTA AMAZÔNIA, 1967, Rio de Janeiro. **Anais**..... Rio de Janeiro: CNP, 1967. v.1 p.215-295.

LEMO, R.L.; GASPAR, J.C. O magmatismo kamafugítico em Maicuru e o seu ambiente tectônico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 41, João Pessoa. **Anais**..., SBG:NE, 2002. p.549.

LI, X. Understanding 3D analytic signal amplitude. **Geophysics**, v. 71, n. 2, p.L13-L16. 2006.

LI, X. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations: **The Leading Edge**, v. 27, n.8, p. 990-1002, 2008.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W.; CHIPMAN, J.W. **Remote sensing and image interpretation**. John Wiley e Sons Inc. 763 p. 2004.

LINSSER, H. **Interpretation of the regional gravity anomalies in the Amazonas area**. Rio de Janeiro: Petrobras. 1958. Relatório técnico.

LOCZY, L. Role of transcurrent faulting in South American tectonic framework; Evidence for separation of South American and African continents before Ordovician time. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 54, n.11, p.:2111-2119, 1970.

MACLEOD, I.N.; JONES K.; DAI, T.F. 3-D analytic signal in the interpretation of total magnetic field data at low magnetic latitudes. **Exploration Geophysics**, v. 24, p. 679-688, 1993.

MATSUDA, N.S.; DINO, R.; WANDERLEY FILHO, J.Q. Revisão litoestratigráfica do Grupo Tapajós, Carbonífero Médio-Permiano da Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 12, p. 435-441. 2004.

MENDES, J.C.; PETRI, S. **Geologia do Brasil**. Instituto Nacional do Livro, Rio de Janeiro, 207pp. 1971.

MILLER, H.G.; SINGH, V. Semiquantitative techniques for the removal of direcional trends from potential field data. **Journal of Applied Geophysics**, v. 32, p.199-211, 1994a.

MILLER, H.G.; SINGH, V. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. **Journal of Applied Geophysics**, v. 32, p.213-217. 1994b.

MILLIGAN, P.R.; GUNN, P.J. Enhancement and presentation of airborne geophysical data. AGSO **Journal of Australian Geology & Geophysics**, v. 17, n. 2, p.63-75, 1997.

MIRANDA, F.P. Sensoriamento remoto na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Amazonas. **Boletim Técnico Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 4, p. 268-291, Out./Dez. 1983.

MONTALVÃO, R.M.G.; OLIVEIRA, A.S. Geologia Branquianticlinal de Monte Alegre e da Rodovia Monte Alegre – Prainha. Belém, **Projeto Radam Brasil**, Folha SA.21, DNPM, 409p. 1975.

MOSMANN, R.; FALKENHEIN, F.U.H.; GONÇALVES, A.; NEPOMUCENO FILHO, F. Oil and gas potential of the Amazon Paleozoic Basins. In: M.T. Halbouty (ed.) **Future petroleum provinces of the world**. AAPG Memoir 40, 1986. p. 207-241.

MOURA, P. **Geologia do Baixo Amazonas**. Serv. Geol. Min. Brasil, Monografia, XCI, Rio de Janeiro, v. 91, p.1-94. 1938.

NABIGHIAN, M.N. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation. **Geophysics**, v. 37, p.507-517, 1972.

NABIGHIAN M.N. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. **Geophysics**, v. 39, p.85-92, 1974.

NABIGHIAN, M.N. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: Fundamental relations. **Geophysics**, v. 49, p.780-786, 1984.

PAIVA, G. DE. **Valle do Rio Negro: Physiographia e Geologia**. Serviço Geológico Mineral. v.40. Rio de Janeiro, 1929. p.1-62. Relatório técnico.

PASTANA, J.M.N; SOUZA, A.M.A; VALE, A.G; FARIA, C.A.S; SANTOS, M.E.C.M.; ASSUNÇÃO, P.R.P.S.; FRIZZO, S.J.; LOBATO, T.A.M. **Projeto Sulfetos de Alenquer-Monte Alegre**. Belém: DNPM-CPRM. 1978. Relatório técnico.

PASTANA, S.M.N. **Síntese geológica e favorabilidade para tipos de jazimentos minerais do Município de Monte Alegre-PA**. Belém:CPRM/PRIMAZ. 1999. 34p. Relatório técnico.

PERICO, E. **Análise estrutural multiescala da província Maroni-Itacaiúnas e da Bacia do Amazonas na região de Altamira, estado do Pará**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2009.

PATERSON, GRANT & WATSON LIMITED - PGW. **Geophysical Data for the Amazonas Region, Brasil** (prepared for University of Paraná by PGW do Brasil Ltda.). 2007. Relatório Técnico.

PINDELL, J. L.; TABBUT, K.D. Mesozoic-Cenozoic Andean paleogeography and controls on hydrocarbon systems. In: Tankard, J. A.; Suárez Soruco, R.; Welsink, H. J. (eds.) **Petroleum Basins of South America**. AAPG Memoir 62, 1995, p. 101-128. 1995.

PLOUFF, D. Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. **Geophysics**, v. 41, n.4, p.727-741, 1976.

QIN, S. An analytical signal approach to the interpretation of total field magnetic anomalies. **Geophysical Prospecting**, v.42, p.665-675, 1994.

RADAMBRASIL. SANTOS, D.B.; FERNANDES, P.E.C.A.; DREHER, A.M.; CUNHA, F.M.B.; BASEI, M.A.S.; TEIXEIRA, J.B.G. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL; **folha SB.21 Tapajós**. Rio de Janeiro. p. 409 (Levantamento de Recursos Naturais, 7). 1975.

REZENDE, W.M. **O mecanismo de intrusões de diabásio nas bacias paleozóicas do Amazonas e do Maranhão**. Rio de Janeiro: Petrobras. 1971. Relatório técnico.

REZENDE, W.M.; BRITO, C.G. Avaliação Geológica da Bacia Paleozóica do Amazonas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, **Anais....**, 1973. p. 228-245.

ROEST, W.R.; VERHOEF, V.; PILKINGTON, M. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal. **Geophysics**, v. 57p. 116-125, 1992.

SALEM, A.; RAVAT, D.; GAMEY, T.J.; USHIJIMA, K. Analytic signal approach and its applicability in environmental magnetic investigations. **Journal of Applied Geophysics**, v. 49, p. 231-244, 2002.

SANTOS, D.B.; FERNANDES, P.E.C.A.; DREHER, A.M.; CUNHA, F.M.B.; BASEI, M.A.S.; TEIXEIRA, J.B.G. **Folha SB.21 Tapajós**, I – Geologia. Projeto RADAM, Brasília, v.7, p. 15-94. 1975.

SANTOS, J.O.S. A parte setentrional da Cráton Amazônico (Escudo das Guianas) e a Bacia Amazônica. In: SCHOBENHAUS, C.; DE CAMPOS, D.A.; DERZE, G.R.; ASMUS, H.E. (coords.) **Geologia do Brasil**, DNPM, 1984, p. 57-91.

SANTOS, J.O.S.; HARTMANN, L.A.; GAUDETTE, H.E.; GROVES, D.I.; MCNAUGHTON, N.J.; FLETCHER, I.R. A New Understanding of the Provinces of the Amazon Craton Base on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. **Gondwana Research**, v. 3, n.4, p. 453-488, 2000.

SANTOS, J.O.S.; HARTMANN, L.A.; FARIA, M.S.; RIKER, S.R.; SOUZA, M.M.; ALMEIDA, M.E.; MCNAUGHTON, N.J. A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, 9., 2006, Belém, **Anais...** Belém:SBG-NO. 2006.

SANTOS, T.B. **Análise Estrutural da Bacia do Amazonas, Região de Itaituba – PA**. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 101p. 2009.

SCHOBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B.B. A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana. In: BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.;

GONÇALVES, J.H. (Ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG**. Brasília: Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2003. p.5-54.

SENA COSTA, J.B.; BEMERGUY, R.L.; HASUI, Y.; BORGES, M.S. Tectonics and paleogeography along the Amazon river. **Journal of South American Earth Science**, v. 14, p.335-347, 2001.

SINGH, B.; GUPTASARMA, D. New method for fast computation of gravity and magnetic anomalies from arbitrary polyhedra. **Geophysics**, v. 66, n.2, p. 521-526, 2001.

SOUZA-LIMA, W. Bacias sedimentares brasileiras – Bacias paleozóicas. **Fundação paleontológica Phoenix**. Aracaju, v. 80, n.7, p. 1-4. 2005.

SPECTOR, A.; GRANT, F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. **Geophysics**, 35(2):293-302. 1970.

TALWANI, M. Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. **Geophysics**, v. 30, n.5, p. 797-817, 1965.

TASSINARI, C.G.C.; MACAMBIRA, M.J.B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes**, v. 22, n3, p.174-182, 1999.

TASSINARI, C.G.C.; MACAMBIRA, M.J.B. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. (eds.) **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo, Ed.Beca, 2004. p. 471-485

TEIXEIRA, W. **Significação tectônica do magmatismo anorogênico básico e alcalino na região Amazônica**. 99f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

TEIXEIRA, W.; TASSINARI C.C.G.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K. A review of geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. **Precambrian Research**, v. 42, p.213-227, 1989.

TELFORD, W.N. **Applied Geophysics**. Cambridge University Press, New York, 860pp. 1976.

THOMPSON, D.T. EULDPH: A New Technique for Making Computer-assisted Depth Estimates from Magnetic Data. **Geophysics**, v. 47, p.31-37, 1982.

THURSTON, J.B.; SMITH, R.S. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using SPI (TM) method. **Geophysics**, v. 62, p.807-813, 1997.

VASQUEZ, M.L.; MACAMBIRA, M.J.B.; GALARZA, M.A. Granitóides transamazônicos da região Iriri-Xingu, Pará – Novos dados geológicos e geocronológicos. In: CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 2005, Manaus. **Anais...** v.4, p. 16-31. 2005.

VASQUEZ, M.L.; MACAMBIRA, M.J.B.; ARMSTRONG, R.A. Shrimp U-Pb ages for granitoids and gneisses from western Bacajá Domain, Southeastern Amazonian Craton, Brasil. In: SYMPOSIUM ON MAGMATISM, CRUSTAL EVOLUTION, AND METALLOGENESIS OF THE AMAZONIAN CRATON, 2006, Belém. **Abstracts volume and field trips guide...** Belém: PRONEX-UFPA/SBG-NO, p. 32. 2006.

VASQUEZ, M.L.; MACAMBIRA, M.J.B.; ARMSTRONG, R.A. Zircon geochronology of granitoids from the western Bacajá domain, southeastern Amazonian craton, Brasil: Neoarchean to Orosirian evolution. **Precambrian Research**, v. 161, p. 279-302. 2008.

VASQUEZ, M.L.; ROSA-COSTA, L.T. **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará**. Belém: CPRM, 328 p. 2008.

VERDUZCO, B.; FAIRHEAD, C.; GREEN, C.; MACKENZIE, C. New Insights into magnetic derivatives for structural mapping. **The Leading Edge**, v. 23, p.116-119, 2004.

WANDERLEY FILHO, J.Q. **Evolução Estrutural da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento**. 125f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1991.

WANDERLEY FILHO, J.Q. A influência dos lineamentos proterozóicos na estruturação da Bacia do Amazonas. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 5, **Resumos expandidos**....., 1996. p. 310-312.

WANDERLEY FILHO J.R.; TRAVASSOS, W.A.S.; ALVES, D.B. O diabásio nas bacias paleozóicas amazônicas – herói ou vilão? **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 14, n.11, 177p., 2006.

WINJS, C.; PEREZ, C.; KOWALCZYK, P. Theta map: Edge detection in magnetic data. **Geophysics**, v. 70, p.L39-L43, 2005.

ZALÁN, P.V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B. **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. p. 595-612. 2004.